

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 4 (78)

Issue 4 (78)

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 28 листопада 2024 року № 13).*

*Ідентифікатор медіа R30-04135 згідно з рішенням Національної ради України
з питань телебачення і радіомовлення від 25.04.2024 № 1416*

*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 • 2024

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*);
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*);
МИРОНЦОВ Микита Леонідович
(*д-р ф.-м. наук, с.н.с., Київ, Україна*);
ПЄВНЄВ Володимир Яковлевич
(*д-р техн. наук, доц., Харків, Україна*);
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*);
ТРИСТАН Андрій Вікторович
(*д-р техн. наук, проф., Черкаси, 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
(*д-р філософії, 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*);
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*);
Andryy LUNTOVSKYY
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Mykyta MYRONTSOV
(*Dr. Sc. (Ph.&M.), Senior Res., Kyiv, Ukraine*);
Volodymyr PEVNEV
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. 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., Krakow, Poland*);
Andrii TRYSTAN
(*Dr. Sc. (Tech.), 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
(*PhD (Tech.), Kharkiv, Ukraine*).

З М І С Т

НАВІГАЦІЯ ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

<i>Пащенко Р. Е., Марюшко М. В.</i> Оцінка впливу контрастності космічних знімків сільськогосподарських культур на величини фрактальних розмірностей та індексів NDVI	5
<i>Церне Е. О., Жила С. С., Попов А. В., Волков Є. Г., Шевчук С. Д., Грибський О. П., Власенко Д. С., Кошарський В. В., Ковальчук Д. І.</i> Комплексування вимірювань в бортовому радіопеленгаторі, що входить до складу системи автономної навігації БПЛА	11

АВТОМОБІЛЬНИЙ, РІЧКОВИЙ, МОРСЬКИЙ ТА АВІАЦІЙНИЙ ТРАНСПОРТ

<i>Горбачов П. Ф., Любий Є. В.</i> Критерій включення регульованого перехрестя в план просторової координації	21
<i>Ковиур К. Г., Птиця Н. В., Пономарьов Д. А.</i> Підвищення ефективності системи постачання швидкопсувних вантажів в напрямку республіка Польща – Україна в сучасних умовах	27

УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

<i>Кислиця Д. В., Басова Ю. О., Кислиця С. Г., Кожушко Г. М., Захарченко Р. В.</i> Системи автоматичного керування освітленням – ефективний шлях економії електроенергії та підвищення якості освітлення	31
<i>Носков В. І., Гавриленко С. Ю., Гейко М. В., Панченко В. І.</i> Контроль використання потужності дизеля на тягу в умовах експлуатації дизель-поїздів	38
<i>Решетнікова П. Е., Заковоротний О. Ю.</i> Математична модель вертикальних коливань рухомого складу, викликаних нерівностями залізничної колії	42

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Бутенко С. І.</i> Особливості корпоративних інформаційних систем	46
<i>Gavrylenko S., Poltoratskyi V.</i> Network intrusion detection model based on convolutional neural networks and tabular data converted into images	52
<i>Дмитренко О. А., Скулиш М. А.</i> Методи збору інформації та реалізації алгоритму доповнювальних навантажень	56
<i>Дяченко В. О., Зубенко С. П., Лубан А. С., Федорченко В. М.</i> Методи та інструменти розробки спеціалізованих інтегральних схем для мобільних систем управління	60
<i>Євтушенко О. С., Заковоротний О. Ю.</i> Застосування нейронних мереж для класифікації коливань рухомого складу	64
<i>Кавецький М. С., Федюшин О. І., Просолов В. В., Фроленко В. О.</i> Аналіз блокчейнів на можливості розробки децентралізованих застосунків	68
<i>Kapiton A., Tyshchenko D., Desiatko A., Lazorenko V.</i> Evolution and distribution analysis of multimodal artificial intelligence systems	75
<i>Kartashov A., Globa L.</i> Towards seamless multi-cloud integration: strategic approach	79
<i>Kaserec A., Globa L. С.</i> Підхід до формування мультимарного середовища на основі багатокритеріального аналізу та онтологічного моделювання	84
<i>Кожевніков Г. К., Маркевич М. І., Матяш О. Ю.</i> Технологія взаємодії між вузлами граничного шару Інтернету речей	92
<i>Крючков О. І., Морозова О. І., Нікітіна Т. С.</i> Мобільні логістичні та моніторингові системи на базі роїв БПЛА: виклики та напрями розвитку	96
<i>Matvieiev M.</i> Analysis of optimization methods of web relationships with augmented reality	106
<i>Мошур О., Деркач Т., Дмитренко А., Клочко Л., Лоза В.</i> Особливості та можливості застосування LLM у сфері розробки програмного забезпечення	109
<i>Omarov M., Muradova V.</i> Cybersecurity problems in the oil and gas industry	114
<i>Osadchy S.</i> Smart packaging of pharmaceutical products	119
<i>Попов С. І., Орехов О. О.</i> Апаратні засоби оброблення інформації в інтелектуальних системах моніторингу лісових пожег на базі роїв БПЛА	123
<i>Rastegayev R., Martovytskyi V., Bolohova N., Filonenko B., Chechui O.</i> Review of methods for embedding digital watermarks for audio file protection	132
<i>Рудницький В. М., Лада Н. В., Ларін В. В., Підласий Д. А.</i> Дискретно-казуальне моделювання елементарних функцій операцій, керованих інформацією	139
<i>Середюк О. А., Ключишніков І. М.</i> Групове застосування безпілотних літальних апаратів та наземних роботизованих засобів: виклики, рішення та перспективи впровадження хмарно-агентних технологій	143
<i>Skakalina O.</i> Models of the spread and demographic consequences of COVID-19	156
<i>Чалий С. Ф., Лециньський В. О.</i> Моделювання пояснень в інтелектуальних системах на основі інтеграції темпоральних та каузальних залежностей	163

Янко А. С., Глушко А. Д., Крук О. І., Прокудін А. Ю. Підвищення ефективності процесу корекції даних у системі залишкових класів 169

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

Бурдейна Н. Б., Підлісний Я. А. Дослідження рівнів електромагнітних полів систем життєзабезпечення будівель і споруд 176

Глива В. А., Осадчий Д. Б. Дослідження рівнів електромагнітних полів на об'єктах електрогенерації та розроблення засобів їх нормалізації 180

Глива В. А., Ткачук К. К., Кашлев М. С. Дослідження рівнів шуму при реконструкції й відновленні будівель і визначення заходів його зниження 184

ЗВ'ЯЗОК, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА

Компанієць В. О., Пустовойтов П. Є. Метод математичного моделювання самоподібного трафіку у інфокомунікаційних мережах 187

Криховецький Г. Я., Зубрицький Г. М., Скорделов В. В., Баленко О. І. Метод визначення статистичних характеристик трафіка розподіленої телекомунікаційної мережі 190

Кузнєцов О. Л., Василюшин В. І., Коломійцев О. В., Болбас Ю. О. Можливості забезпечення заданої завадозахищеності систем радіозв'язку та радіолокації в реальних умовах розповсюдження радіохвиль .. 194

Леві Л. І., Євдоченко О. І., Куц О. О., Ястреба О. С., Бабич С. І. Багатокритеріальний підхід до синтезу мультисервісних телекомунікаційних мереж 200

Пустовойтов П. С., Охрименко М. Ю. Метод аналізу якості логічних каналів та вибір маршрутів у одноранговій сенсорній мережі 204

Худов Г. В., Грідасов І. Ю., Хижняк І. А., Юзова І. Ю., Калімулін Т. М., Соломоненко Ю. С., Райков Р. Ю. Аналіз тактико-технічних характеристик та тактики застосування основних засобів радіоелектронної боротьби (ближньої дії) російської федерації 209

Shefer O., Myhal S. Analysis of the main requirements for 5G/6G networks 219

Штомпель М. А. Біоінспірована оптимізація недвійкових кодів з малою щільністю перевірок на парність 223

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК 226

Організації авторів

Лянкоранський державний університет, Азербайджан
Федеральна політехнічна школа, Лозанна,
Швейцарія

Державний НДІ випробувань і сертифікації озброєння та
військової техніки, Черкаси, Україна

Державний торговельно-економічний університет, Київ,
Україна

Інститут радіофізики та електроніки імені О. Я. Усикова
НАН України, Харків, Україна

Київський національний університет будівництва і
архітектури, Київ, Україна

Науково-дослідний інститут воєнної розвідки, Київ, Україна

Науково-дослідний інститут «ОПІОН», Київ, Україна

Національний аерокосмічний університет імені

М. С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

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

Національний технічний університет України «КПІ імені
Ігоря Сікорського», Київ, Україна

Національний університет «Полтавська політехніка імені
Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

Полтавський державний аграрний університет, Україна

Харківський національний автомобільно-дорожній

університет, Харків, Україна

Харківський національний університет радіоелектроніки,
Харків, Україна

Харківський національний університет Повітряних Сил
імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

Українська державна льотна академія, Кропивницький,
Україна

Український державний університет залізничного
транспорту, Харків, Україна

Черкаський державний технологічний університет,
Черкаси, Україна

Authors affiliation

Lankaran State University, Lankaran, Azerbaijan
École Polytechnique Fédérale de Lausanne,
Lausanne, Switzerland

SR Institute of Testing and Certification of
Weapons and Military Equipment, Cherkasy, Ukraine
State University of Trade and Economics, Kiev,
Ukraine

O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and
Electronics, Kharkiv, Ukraine

Kyiv National University of Construction and
Architecture, Kyiv, Ukraine

Research Institute of Military Intelligence, Ukraine
SE "SRI"OION", Kyiv, Ukraine

National Aerospace University named after
M.E. Zhukovsky "KHA", Kharkiv, Ukraine

National Technical University "Kharkiv Polytechnic
Institute", Kharkiv, Ukraine

National Technical University "Igor Sikorsky Kyiv
Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

National University "Yuri Kondratyuk Poltava
Polytechnic", Poltava, Ukraine

Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Kharkiv National Automobile and Highway

University, Kharkiv, Ukraine

Kharkiv National University of Radio Electronics,
Kharkiv, Ukraine

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force
University, Kharkiv, Ukraine

Ukrainian State Flight Academy, Kropyvnytskyi,
Ukraine

Ukrainian State University of Railway Transport,
Kharkiv, Ukraine

Cherkasy State Technological University, Cherkasy,
Ukraine

Навігація та геоінформаційні системи

УДК 528.88 + 515.127.1

doi: 10.26906/SUNZ.2024.4.005

Р. Е. Пащенко¹, М. В. Марюшко²

¹ Інститут радіофізики та електроніки імені О. Я. Усикова НАН України, Харків, Україна

² Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

ОЦІНКА ВПЛИВУ КОНТРАСТНОСТІ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР НА ВЕЛИЧИНИ ФРАКТАЛЬНИХ РОЗМІРНОСТЕЙ ТА ІНДЕКСІВ NDVI

Анотація. Космічні знімки, які використовуються для моніторингу сільськогосподарських земель, можуть мати різну контрастність, що може впливати на якість проведення оцінки стану сільськогосподарських культур. **Предметом** дослідження є оцінка впливу контрастності космічних знімків на величини фрактальних розмірностей та індексів NDVI. **Об'єктом** дослідження є космічні знімки супутника Sentinel-2 сільськогосподарських культур з різною контрастністю. **Метою** є оцінка впливу контрастності космічних знімків полів, засіяних сільськогосподарськими культурами, на величини фрактальних розмірностей та індексів NDVI. **Отримані наступні результати.** Проведена оцінка максимальних і мінімальних значень яскравості при зміні контрастності вихідних знімків різних каналів (каналів b4 і b8) супутника Sentinel-2 та визначено, що наявність рослинності на полі впливає на їх поведінку. Зміна діапазону яскравості на знімку при зміні контрастності також залежить від каналу супутника Sentinel-2 та наявності рослинності на полі. Досліджено вплив контрастності космічних знімків на величини фрактальних розмірностей та індексів NDVI. Визначено, що під час збільшення контрастності знімка мінімальні, максимальні і середні значення індексів NDVI збільшуються, а під час зменшення контрастності – зменшуються. При цьому різниця у величині індексу NDVI складає близько 0,3. Якщо для оцінки стану посівів вибрати можливу зміну середнього індексу NDVI для різних полів у межах $\pm 0,1$, то при зміні контрастності більше $\pm 20\%$ приймати рішення про стан посівів стає неможливим. Показано, що середні фрактальні розмірності знімка каналу b8 при збільшенні контрастності зменшуються на 0,02, а при зменшенні контрастності – збільшуються на 0,01. Якщо для оцінки стану посівів вибрати можливу зміну середньої фрактальної розмірності для різних полів у межах $\pm 0,02$, то стан посівів при зміні контрастності можна оцінювати при зменшенні контрастності до -50% і при збільшенні контрастності – до $+40\%$. **Висновки.** Проведені дослідження показали, що застосування середніх фрактальних розмірностей для оцінки стану посівів дозволяє проводити аналіз космічних знімків при більшій зміні їх контрастності, порівняно з використанням середніх індексів NDVI.

Ключові слова: оцінка стану сільськогосподарських культур, контрастність космічного знімка, фрактальна розмірність, індекс NDVI.

Вступ

Моніторинг сільськогосподарських земель дозволяє регулярно отримувати інформацію про стан і структуру земельних ділянок та посівних площ. Крім того, агроекологічний моніторинг дозволяє оцінювати вплив природних, техногенних і антропогенних факторів на посіви сільськогосподарських культур [1].

У сучасних умовах динаміка проведення сільськогосподарських робіт потребує оперативної оцінки їх результатів і стану сільськогосподарських культур. Вирішення цих завдань забезпечує регулярний космічний моніторинг земель сільськогосподарського призначення. Останнім часом спостерігається тенденція зростання доступності до даних дистанційного зондування. Наприклад, космічні знімки Sentinel-2 надаються користувачам у вільному доступі через мережу Інтернет (існує актуальна та постійно поповнювальна база космічних знімків), що дозволяє їх застосування для вирішення різноманітних задач [2, 3]. Супутники Sentinel-2 дозволяють отримувати ширококутові мультиспектральні зображення з високим просторовим розпо-

ділом (в одному пікселі 10 м) за допомогою знімальної апаратури MSI (Multispectral Instrument) у 13 спектральних діапазонах [3]. Космічні знімки супутника Sentinel-2 на задану територію можна отримувати 2 рази на тиждень.

Велика кількість методів моніторингу сільськогосподарських земель базується на використанні вегетаційних індексів (існує близько 160 варіантів таких індексів) [4], які визначаються емпірично і враховують фізичні властивості світла, відбиваючу здатність рослин та інші важливі характеристики. Серед всіх існуючих індексів найбільше розповсюдження отримав нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI). В роботі [5] приведені результати досліджень змін індексу NDVI різночасових космічних знімків сільськогосподарських земель. У роботі вказується, що для розрахунку індексу NDVI необхідно дані з ближнього інфрачервоного та червоного каналів, що призводить до ускладнення отримання вихідного зображення. А також, індекс NDVI у значній мірі залежить від кількості активної біомаси та стає неефективним в періоди, коли рослинність є послабленою або спостерігається низький рівень вегетації.

Перспективним напрямком підвищення інформативності космічних знімків, які отримуються тільки в одному діапазоні хвиль, є застосування методів фрактального аналізу зображень [6, 7]. Різна складність поверхонь та рослинності приводить до різних форм цифрового зображення, складність яких можна кількісно оцінити за допомогою величини фрактальної розмірності. У роботі [8] на основі даних дистанційного зондування та використання ФР показана можливість розподілу різних типів ґрунтів, а у роботах [9, 10] показана можливість застосування фрактального аналізу космічних знімків супутника Sentinel-2 для оцінки стану посівів кукурудзи [9] та полів, засіяних іншими культурами (соняшником, пшеницею, ячменем і гречкою) [10] на різних фазах вегетації, але у цих роботах не розглядається питання оцінки впливу контрастності космічних знімків на величини

Мета статті: оцінити вплив контрастності космічних знімків полів, засіяних сільськогосподарськими культурами, на величини фрактальних розмірностей та індексів NDVI.

Формування космічних знімків сільськогосподарських земель з різною контрастністю

Для дослідження впливу контрастності космічних знімків сільськогосподарських культур на величини фрактальних розмірностей та індексів NDVI було штучно створено набір елементів космічного знімка поля, засіяного кукурудзою, з різною контрастністю. Для цього застосовувалася комп'ютерна програма Microsoft Word 2013. Знімки представлені у градаціях сірого у форматі *.bmp і мають розміри 56×56 пікселів. Розмір зображення 56×56 пікселів був вибраний з міркувань отримання однорідної структури поля на знімку.

Контрастність є відношенням найсвітліших областей зображення до найтемніших [11]. У програмі Microsoft Word 2013 контрастність регулюється за допомогою спеціальних шаблонів, які мають різні ступені експозиції. Експозиція, у свою чергу, визначає ступінь освітлення/затемнення. Під час використання засобів настройки, програма Microsoft Word 2013 автоматично здійснює зміни в діапазоні яскравості [11].

Для зміни контрастності космічного знімка, він завантажувалася на сторінку програми Microsoft Word 2013. Після цього знімок виділявся і здійснювався перехід до вкладки «Формат». У групі «Змінити» (ліворуч на верхній панелі) вибиралася вкладка «Корекція», і у вікні, що відкривалося, вибиралася вкладка «Параметри корекції рисунка». Після цього праворуч у вікні, що відкрилося, «Формат рисунка» на вкладці «Настройка рисунка» в області «Контрастність» вибиралося потрібне значення контрастності (у відсотках). Позитивні значення відсотків збільшують контрастність знімка, а негативні – зменшують. Зменшення контрастності приводить до розмиття знімка, а підвищення – до покращення чіткості знімка, але при цьому втрачаються плавні переходи на знімку, і збільшується його зернистість [11].

Після проведення цих операцій, змінений знімок (з іншою контрастністю) виділявся і він зберігався з іншою назвою у форматі .bmp.

При збільшенні контрастності від 0 до +50% елементи космічних знімків каналу b4 ставали більш темними, а при зменшенні контрастності від 0 до -50%, навпаки, більш світлими. Збільшення зернистості знімка під час збільшення контрастності і розмиття знімка під час її зменшення візуально не спостерігаються, що, скоріше за все, пов'язано з однорідністю космічного знімка і наявністю переважно темних пікселів на знімку каналу b4 (максимальна яскравість на вихідному знімку 28 градацій яскравості з 255 можливих).

Розглянемо як змінюються максимальні і мінімальні яскравості на знімку, що досліджується, під час збільшення і зменшення його контрастності.

У табл. 1 наведено максимальні, мінімальні яскравості та їх різниця (Δ) на знімках двох каналів супутника Sentinel-2 (b4 і b8) поля з кукурудзою станом на 31.07.2021 при збільшенні контрастності від 0% до +50% у програмі Microsoft Word.

Таблиця 1 – Максимальна і мінімальна яскравості та їх різниця на знімках поля з кукурудзою станом на 31.07.2021 при збільшенні контрастності

Контрастність знімку	Яскравість					
	канал b4			канал b8		
	Мін.	Макс.	Δ	Мін.	Макс.	Δ
0%	22	28	6	112	142	30
+10%	19	24	5	110	144	34
+20%	16	20	4	107	147	40
+30%	13	16	3	104	150	46
+40%	9	12	3	100	153	53
+50%	4	6	2	95	158	63

Як видно з аналізу даних табл. 1, при збільшенні контрастності знімка каналу b4 максимальні і мінімальні яскравості зменшуються, а діапазон яскравості (різниця) зростає у три рази з 6 градацій яскравості до 2. Як зазначалося вище, це пов'язано, скоріше за все, з переважною наявністю на знімку каналу b4 темних пікселів. Також у табл. 1 видно, що діапазон зміни яскравості на знімку каналу b4 дуже вузький і складає 6 градацій яскравості.

На відміну від знімка каналу b4 знімок каналу b8 (див. табл. 1 праворуч) є значно світлішим (максимальна яскравість на вихідному знімку 142 градації яскравості з 255 можливих) і має у 5 разів ширший діапазон зміни яскравості. Крім того, при збільшенні контрастності знімка каналу b8, максимальні яскравості на знімку збільшуються, а мінімальні – зменшуються, при цьому діапазон яскравості (різниця) розширюється більше ніж у два рази з 30 градацій яскравості до 63, що призводить до появи зернистості.

У табл. 2 наведено максимальні, мінімальні яскравості та їх різниця (Δ) на знімках двох каналів супутника Sentinel-2 (b4 і b8) поля з кукурудзою станом на 31.07.2021 при зменшенні контрастності від 0% до -50% у програмі Microsoft Word.

Таблиця 2 – Максимальна і мінімальна яскравості та їх різниця на знімках поля з кукурудзою станом на 31.07.2021 при зменшенні контрастності

Контрастність знімку	Яскравість					
	канал b4			канал b8		
	Мін.	Макс.	Δ	Мін.	Макс.	Δ
0%	22	28	6	112	142	30
-10%	26	32	6	114	140	26
-20%	30	38	8	116	138	22
-30%	37	45	8	117	137	20
-40%	47	55	8	119	136	17
50%	60	67	7	120	134	14

У табл. 2 видно, що при зменшенні контрастності знімка каналу b4 максимальні і мінімальні яскравості збільшуються, а діапазон яскравості (різниця) змінюється не значно з 6 градацій яскравості до 7 або 8.

Праворуч у табл. 2 також видно, що при зменшенні контрастності знімка каналу b8 максимальні яскравості на зображенні зменшуються, а мінімальні – збільшуються, але діапазон яскравості (різниця) звужується у два рази з 30 градацій яскравості до 14. Як зазначалося вище, це пов'язано, скоріше за все, різною структурою і яскравістю вихідних знімків каналів b4 і b8.

У табл. 3 наведено максимальні, мінімальні яскравості та їх різниця (Δ) на знімках двох каналів супутника Sentinel-2 (b4 і b8) поля, на якому була посіяна кукурудза станом на 22.10.2021 при збільшенні контрастності від 0% до +50% у програмі Microsoft Word, а у табл. 4 – при зменшенні контрастності від 0% до -50%. Тобто аналізувалися елементи знімків поля після збирання врожаю (при відсутності на полі рослинності).

Таблиця 3 – Максимальна і мінімальна яскравості та їх різниця на знімках поля, на якому була посіяна кукурудза станом на 22.10.2021 при збільшенні контрастності

Контрастність знімку	Яскравість					
	канал b4			канал b8		
	Мін.	Макс.	Δ	Мін.	Макс.	Δ
0%	53	77	24	68	89	21
+10%	47	71	24	62	84	22
+20%	41	64	23	55	78	23
+30%	34	57	23	48	71	23
+40%	26	48	22	39	63	24
+50%	17	38	21	29	53	24

Як видно з аналізу даних табл. 3, при збільшенні контрастності знімків обох каналів (каналів b4 і b8) максимальні і мінімальні яскравості зменшуються, а діапазон яскравості (різниця) змінюється не значно на 3 градації яскравості, але для каналу b4 різниця зменшується, для каналу b8 – збільшується на однакову величину.

Таким чином, характер зміни яскравості на космічних знімках двох каналів супутника Sentinel-2 залежить від наявності або відсутності на них рослинності.

У табл. 4 видно, що при зменшенні контрастності знімків каналів b4 і b8 максимальні і мінімальні яскравості збільшуються, а діапазон яскравості (різниця) зменшується на 10 градацій яскравості.

Таблиця 4 – Максимальна і мінімальна яскравості та їх різниця на знімках поля, на якому була посіяна кукурудза станом на 22.10.2021 при зменшенні контрастності

Контрастність знімку	Яскравість					
	канал b4			канал b8		
	Мін.	Макс.	Δ	Мін.	Макс.	Δ
0%	53	77	24	68	89	21
-10%	59	83	24	74	94	20
-20%	66	88	22	80	98	18
-30%	73	93	20	86	102	16
-40%	81	98	17	92	106	14
-50%	89	103	14	98	109	11

Таким чином, проведений аналіз показує, що наявність рослинності на полі впливає на поведінку максимальних і мінімальних значень яскравості при зміні контрастності вихідних знімків різних каналів (каналів b4 і b8) супутника Sentinel-2. Зміна діапазону яскравості на знімку при зміні контрастності також залежить від каналу супутника Sentinel-2 та наявності рослинності на полі. Проведемо аналіз впливу цих змін на величини індексів NDVI і фрактальних розмірностей.

Вплив контрастності космічних знімків на величини фрактальних розмірностей та індексів NDVI

Для моніторингу сільськогосподарських земель у теперішній час найчастіше використовуються вегетаційні індекси [4]. Розрахунок більшої частини вегетаційних індексів базується на двох найбільш стабільних (не залежних від інших чинників) ділянках кривої спектральної відбивної здатності рослин. На червону зону спектру (0,62-0,75 мкм) доводиться максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом, а на ближню інфрачервону зону (0,75-1,3 мкм) – максимальне відбиття енергії клітинною структурою листа. Тобто, висока фотосинтетична активність (зв'язана, як правило, з великою фітомасою рослинності) веде до нижчих значень коефіцієнтів відбиття в червоній зоні спектру і великим значенням в ближній інфрачервоній. Найбільше розповсюдження для розрізнення рослинності від інших природних об'єктів отримав нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI). Нормалізований різницевий вегетаційний індекс розраховується за виразом [4]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

де *NIR* – відбивальна інфрачервона область спектру (760-900 нм), що відповідає каналу b8 (832 нм) для супутника Sentinel-2; *RED* – видима червона область спектру (630-690 нм), що відповідає каналу b4 (665 нм) для супутника Sentinel-2.

До основних недоліків цього індексу відносять так зване «насичення» індексу при великій кількості

рослин і його виходом на плато, а також вплив відбивних властивостей поверхні ґрунтів на його величину при низькій зімкнутості рослин [5]. Крім того, на цей індекс впливає засміченість посівів на різних фазах вегетації по-різному. Все це приводить до додаткових похибок під час моніторингу сільськогосподарських культур.

Основою фрактального аналізу космічних (цифрових) знімків є побудова поля фрактальних розмірностей (ПФР). Процес побудови ПФР детально розглянуто у роботі [7]. Під час побудови ПФР проводиться сканування зображення «вікном», розміром $n \times m$ пікселів, з кроком переміщення s (при $s = 1$ «вікно» є таким, що «ковзає», а при $s > 1$ – що «стрибає»). Для кожного положення «вікна» визначається числове значення фрактальної розмірності у «вікні» і записується в матрицю D , яка називається «полем фрактальних розмірностей». Під час побудови ПФР у роботі розміри елемента космічного знімка складають 56×56 пікселів, а розміри «ковзаючого вікна» ($s = 1$) дорівнюють $n \times m = 4 \times 4$ пікселі.

На практиці найчастіше для аналізу цифрових знімків з використанням фрактальної розмірності застосовують метод покриття [12], який реалізує визначення розмірності Гаусдорфа – Безиковича, яка описується виразом:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)}, \quad (2)$$

де ε – довжина сторони куба (максимальна довжина дорівнює розміру «вікна»), яким покривають тривимірне представлення цифрового знімка; $N(\varepsilon)$ – кількість кубів, що накривають знімок.

Безпосередньо за цією формулою розрахувати фрактальну розмірність знімка підстильної поверхні неможливо. Порядок визначення фрактальної розмірності за методом покриття докладно описано у роботі [12]. У роботах [5, 9] зазначалося, що найбільш інформативними під час оцінки стану сільськогосподарських культур є мінімальні, максимальні і середні значення індексів NDVI і фрактальних розмірностей.

Розглянемо вплив контрастності космічного знімка на мінімальні, максимальні і середні значення індексів NDVI і фрактальних розмірностей поля, засіяного кукурудзою.

У табл. 5 наведено мінімальні, максимальні і середні значення індексів NDVI, а у табл. 6 мінімальні, максимальні і середні значення і фрактальних розмірностей (каналів b4 і b8) знімка поля з кукурудзою станом на 31.07.21 при різній контрастності.

Як видно з аналізу даних табл. 5, при збільшенні контрастності знімка мінімальні, максимальні і середні значення індексів NDVI збільшуються, а при зменшенні контрастності – зменшуються. При цьому різниця у величині індексу NDVI складає близько 0,3, тобто зміна відбувається у першому знаку після коми. Якщо для оцінки стану посівів вибрати можливу зміну середнього індексу NDVI для різних полів у межах $\pm 0,1$, то, як видно у табл. 5, при зміні контрастності більше $\pm 20\%$ приймати рішення про стан посівів стає неможливим.

Таблиця 5 – Значення індексу NDVI знімка поля з кукурудзою станом на 31.07.21 при різній контрастності

Контрастність знімку	Індекс NDVI		
	NDVI _{мін}	NDVI _{макс}	NDVI _{сеп}
0%	0,612	0,701	0,679
+10%	0,654	0,735	0,717
+20%	0,685	0,782	0,759
+30%	0,739	0,829	0,806
+40%	0,802	0,877	0,858
+50%	0,881	0,939	0,929
0%	0,612	0,701	0,679
-10%	0,572	0,657	0,636
-20%	0,517	0,607	0,584
-30%	0,453	0,542	0,517
-40%	0,376	0,458	0,434
-50%	0,290	0,362	0,337

Таблиця 6 – Значення фрактальної розмірності знімків поля з кукурудзою станом на 31.07.21 при різній контрастності

Контрастність знімку	Фрактальна розмірність					
	канал b4			канал b8		
	D _{мін}	D _{макс}	D _{сеп}	D _{мін}	D _{макс}	D _{сеп}
0%	2,924	2,998	2,963	2,958	2,996	2,982
+10%	2,933	3,000	2,975	2,953	2,996	2,980
+20%	2,906	3,000	2,952	2,944	2,995	2,977
+30%	2,904	3,000	2,948	2,937	2,995	2,973
+40%	2,891	3,000	2,956	2,925	2,996	2,969
+50%	2,850	3,000	2,933	2,914	2,993	2,963
0%	2,924	2,998	2,963	2,958	2,996	2,982
-10%	2,934	2,998	2,968	2,968	2,998	2,985
-20%	2,926	2,999	2,963	2,966	2,999	2,987
-30%	2,937	2,999	2,967	2,970	2,998	2,988
-40%	2,948	2,999	2,974	2,974	2,999	2,990
-50%	2,969	2,999	2,985	2,980	2,999	2,992

З даних табл. 6 видно, що характер змін мінімальних, максимальних і середніх значень фрактальних розмірностей для каналів b4 і b8 знімка поля з кукурудзою відрізняються між собою. Так для космічного знімка каналу b4 мінімальні і середні фрактальні розмірності при збільшенні контрастності спочатку збільшуються, а потім зменшуються. При зменшенні контрастності знімка каналу b4, навпаки, мінімальні і середні фрактальні розмірності спочатку зменшуються, а потім збільшуються. Тобто можна зазначити, що для космічних знімків каналу b4 спостерігається не монотонна зміна фрактальних розмірностей.

Для космічного знімка каналу b8 (див. табл. 6 праворуч) характер змін мінімальних і середніх фрактальних розмірностей більш прогнозований, при збільшенні контрастності вони зменшуються, а при зменшенні контрастності – збільшуються. У зв'язку з цим доцільно проводити аналіз стану посівів з використанням космічних знімків каналу b8 супутника Sentinel-2. Максимальні значення фрактальних розмірностей для обох каналів практично не відрізняються при різній контрастності знімка.

У табл. 6 також видно, що середні фрактальні розмірності знімка каналу b8 при збільшенні конт-

растності зменшуються на 0,02, а при зменшенні контрастності – збільшуються на 0,01, тобто зміна середніх фрактальних розмірностей відбувається у другому знаку після коми. Менші зміни середніх фрактальних розмірностей при зменшенні контрастності обумовлено згладжуванням знімка, тобто його порізанисть стає меншою.

Якщо для оцінки стану посівів вибрати можливу зміну середньої фрактальної розмірності для різних полів у межах $\pm 0,02$, то стан посівів при зміні контрастності можна оцінювати при зменшенні контрастності до -50% і при збільшенні контрастності – до $+40\%$.

Таким чином, застосування середніх фрактальних розмірностей для оцінки стану посівів дозволяє проводити аналіз космічних знімків при більшій зміні їх контрастності, порівняно з використанням середніх індексів NDVI.

У табл. 7 наведено мінімальні, максимальні і середні значення індексів NDVI, а у табл. 8 мінімальні, максимальні і середні значення фрактальних розмірностей (каналів b4 і b8) знімка поля, яке було засіяно кукурудзою, станом на 22.10.21 при різній контрастності.

Таблиця 7 – Значення індексу NDVI знімка поля, яке було засіяно кукурудзою, станом на 22.10.21 при різній контрастності

Контрастність знімку	Індекс NDVI		
	NDVI _{мін}	NDVI _{макс}	NDVI _{сер}
0%	0,016	0,142	0,077
+10%	0,017	0,152	0,084
+20%	0,020	0,177	0,097
+30%	0,023	0,186	0,108
+40%	0,028	0,224	0,134
+50%	0,020	0,030	0,174
0%	0,016	0,142	0,077
-10%	0,014	0,133	0,069
-20%	0,013	0,115	0,058
-30%	0,012	0,104	0,048
-40%	0,011	0,084	0,039
-50%	0,005	0,067	0,031

Таблиця 8 – Значення фрактальної розмірності знімка поля, яке було засіяно кукурудзою, станом на 22.10.21 при різній контрастності

Контрастність знімку	Фрактальна розмірність					
	канал b4			канал b8		
	D _{мін}	D _{макс}	D _{сер}	D _{мін}	D _{макс}	D _{сер}
0%	2,934	2,994	2,970	2,936	2,994	2,974
+10%	2,928	2,993	2,968	2,922	2,993	2,971
+20%	2,919	2,992	2,964	2,908	2,993	2,965
+30%	2,907	2,991	2,959	2,897	2,992	2,959
+40%	2,887	2,989	2,950	2,880	2,990	2,952
+50%	2,852	2,995	2,939	2,840	2,988	2,939
0%	2,934	2,994	2,970	2,936	2,994	2,974
-10%	2,940	2,994	2,973	2,946	2,998	2,979
-20%	2,951	2,999	2,978	2,955	2,998	2,981
-30%	2,960	2,999	2,982	2,958	2,998	2,984
-40%	2,966	2,999	2,985	2,967	2,999	2,987
-50%	2,973	2,999	2,989	2,974	2,999	2,990

Аналіз даних табл. 7 і 8 показує, що у разі відсутності рослинності на полі при збільшенні контрастності знімка характер змін мінімальних, максимальних і середніх значень індексів NDVI та фрактальних розмірностей залишається таким же, як і при наявності посівів кукурудзи. При цьому зміна величин індексів NDVI знаходиться у діапазоні значень, що характеризують відсутність рослинності, тобто при зміні контрастності знімка буде прийматися правильне рішення про стан поля.

Характер і величина змін мінімальних і середніх значень фрактальних розмірностей космічного знімка каналу b8 при збільшенні контрастності також дозволяє приймати правильне рішення про стан поля, але при зменшенні контрастності знімка більше -20% середні значення фрактальних розмірностей не дозволяють правильно оцінити стан поля. Як зазначалося вище, це пов'язано із згладжуванням знімка (його меншою порізанистю), що приводить до збільшення середніх значень фрактальних розмірностей.

Таким чином, під час застосування середніх фрактальних розмірностей для оцінки космічних знімків полів при зміні контрастності необхідно брати до уваги пору року. Під час наявності рослинності на полі аналіз космічного знімка при зменшенні їх контрастності можливий, а при відсутності рослинності можливі помилки при зменшенні контрастності знімка більше -20% .

Висновки

Останнім часом для моніторингу сільськогосподарських земель все частіше використовуються космічні знімки, які є у вільному доступі у мережі Інтернет. Такі космічні знімки можуть мати різну контрастність, що може впливати на якість проведення оцінки стану сільськогосподарських культур.

Наявність рослинності на полі впливає на поведінку максимальних і мінімальних значень яскравості при зміні контрастності вихідних знімків різних каналів (каналів b4 і b8) супутника Sentinel-2. Зміна діапазону яскравості на знімку при зміні контрастності також залежить від каналу супутника Sentinel-2 та наявності рослинності на полі.

Велика кількість методів моніторингу сільськогосподарських земель базується на використанні вегетаційних індексів, зокрема нормалізованого різницевого вегетаційного індексу (індексу NDVI). Але для розрахунку вегетаційних індексів необхідні дані двох і більше спектральних діапазонів (багатоспектральні знімки). Також для оцінки змін стану сільськогосподарських культур застосовується фрактальний аналіз космічних знімків, який базується на побудові поля фрактальних розмірностей. При цьому під час побудови ПФР використовуються дані тільки з одного каналу супутника Sentinel-2 (канал b8).

Різна контрастність космічних знімків полів, засіяних сільськогосподарськими культурами, приводить до необхідності проведення дослідження впливу контрастності на величини фрактальних розмірностей та індексів NDVI.

Під час збільшення контрастності знімка мінімальні, максимальні і середні значення індексів NDVI збільшуються, а під час зменшення контрастності – зменшуються. При цьому різниця у величині індексу NDVI складає близько 0,3. Якщо для оцінки стану посівів вибрати можливу зміну середнього індексу NDVI для різних полів у межах $\pm 0,1$, то при зміні контрастності більше $\pm 20\%$ приймати рішення про стан посівів стає неможливим.

Середні фрактальні розмірності знімка каналу b8 при збільшенні контрастності зменшуються на 0,02, а при зменшенні контрастності – збільшуються на 0,01. Якщо для оцінки стану посівів вибрати можливу зміну середньої фрактальної розмірності для

різних полів у межах $\pm 0,02$, то стан посівів при зміні контрастності можна оцінювати при зменшенні контрастності до -50% і при збільшенні контрастності – до $+40\%$.

Застосування середніх фрактальних розмірностей для оцінки стану посівів дозволяє проводити аналіз космічних знімків при більшій зміні їх контрастності, порівняно з використанням середніх індексів NDVI.

Під час подальших досліджень, доцільно здійснити оцінку впливу яскравості космічних знімків полів, засіяних сільськогосподарськими культурами, на величини фрактальних розмірностей та індексів NDVI.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тараріко О.Г., Сиротенко О.В., Ільєнко Т.В., Кучма Т.Л. Агроекологічний супутниковий моніторинг. Київ: Аграр. наука, 2019. 204 с.
2. Copernicus Europe's eyes on Earth, Sentinel-2. Copernicus Europe's eyes on Earth. URL: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus/infrastructure/discover-our-satellites> – 09.05.2023 р.
3. ESA Sentinel Online, Spatial Resolution. ESA Sentinel Online. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial> – 09.05.2023 р.
4. Черепанов А.С. Вегетационные индексы. *Геоматика*. 2011. № 2(11). С. 98 – 102.
5. Марюшко М.В., Пащенко Р.Е., Коблюк Н.С. Моніторинг сільськогосподарських культур із застосуванням космічних знімків SENTINEL-2. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2019. №1(89). С. 99 – 108. DOI: [10.32620/reks.2019.1.11](https://doi.org/10.32620/reks.2019.1.11).
6. Feder J. *Fractals*. New York: Springer US, 1988. 263 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2124-6>.
7. Доля Г.Н., Иванов В.К., Кучук Г.А., Пащенко Р.Э. и др. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов / Под. ред. Р.Э. Пащенко. Харьков: “НЭО Эксперспектива”, 2006. 348 с.
8. Pashchenko R., Mariushko M. Analysis of the Earth's Surface Type in Remote Sensing Using Fractal Dimension. *IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), MRRS-2020*. 2020. – P. 1 – 4. DOI: [10.1109/ukrmw49653.2020.9252811](https://doi.org/10.1109/ukrmw49653.2020.9252811).
9. Марюшко М.В., Пащенко Р.Е. Фрактальный анализ космических снимков SENTINEL-2 для мониторинга сельскохозяйственных культур. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2020. №4(96). С. 34 – 47. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2020.4.03>.
10. Пащенко Р.Е., Марюшко М.В. Оцінка стану різних сільськогосподарських культур з використанням фрактального аналізу. *Сучасні інформаційні системи*. 2023. Том. 7, № 3. С. 81 – 88. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.12>
11. Настройка яркости, контрастности и резкости рисунка. *Microsoft support*. URL: <https://support.microsoft.com/ru-ru/office/настройка-яркости-контрастности-и-резкости-рисунка-48f8f54b-3db7-4652-8928-9ace995240c7>. – 09.11.2023 р.
12. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Постмаркет, 2000. 352 с.

Received (Надійшла) 25.05.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.09.2024

Estimation influencing contrast of agricultural cultures spaces pictures on sizes fractals dimensions and indexes NDVI

Ruslan Pashchenko, Maksym Mariushko

Abstract. Spaces pictures in-use for monitoring agricultural earths can have a different contrast that can influence on quality through estimation of the state agricultural cultures. The **subject** of the study in the article is estimation of influencing contrast spaces pictures on the sizes fractals dimensions and indexes NDVI. The **object** of the study is the spaces pictures of agricultural cultures satellite Sentinel-2 with a different contrast. The **goal** is estimation influencing contrast spaces pictures of the fields sown by agricultural cultures, on the sizes fractals dimensions and indexes NDVI. **The following results were obtained.** Conducted estimation maximal and minimum values of brightness at the change contrast initial pictures of the different channel (channel b4 and b8) satellite Sentinel-2 and it is certain that the presence vegetation on the field influences on their conduct. Change range of brightness on a picture at the change contrast also depends on the channel of satellite Sentinel-2 and presences vegetation on the field. Influence contrast spaces pictures is investigational on the sizes fractals dimensions and indexes NDVI. It is certain that during the increase contrast picture the minimum, maximal and average values indexes NDVI are multiplied, and during diminishing contrast – diminish. Thus a difference in the size index NDVI makes about 0,3. If for estimation the state sowing to choose the possible change average index NDVI for the different fields in scopes $\pm 0,1$, at the change contrast anymore $\pm 20\%$ to make decision about the state of sowing becomes impossible. It is show that average fractals dimension picture of channel b8 at the increase contrast diminish on 0,02 and at diminishing contrast – Is increased on 0,01. If for estimation of the state sowing to choose the possible change average fractal dimension for the different fields in scopes $\pm 0,02$, that state sowing at the change of contrast it is possible to estimate at diminishing contrast to -50% and at the increase contrast – to $+40\%$. **Conclusions.** The conducted researches showed that application average fractals dimensions for estimation of the state sowing allows to conduct the analysis spaces pictures at the greater change their contrast, as compared to the use average indexes NDVI.

Keywords: estimation the state of agricultural cultures, contrast of space picture, fractal dimension, index NDVI.

Е. О. Церне¹, С. С. Жила¹, А. В. Попов¹, Є. Г. Волков², С. Д. Шевчук², О. П. Грибський²,
Д. С. Власенко¹, В. В. Кошарський¹, Д. І. Ковальчук¹

¹ Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "ХАІ", Харків, Україна

² Державне підприємство «Науково-дослідний інститут «ОРІОН», Київ, Україна

КОМПЛЕКСУВАННЯ ВИМІРЮВАНЬ В БОРТОВОМУ РАДІОПЕЛЕНГАТОРІ, ЩО ВХОДИТЬ ДО СКЛАДУ СИСТЕМИ АВТОНОМНОЇ НАВІГАЦІЇ БПЛА

Анотація. Стаття присвячена розробленню методу функціонування недорогого, простого за реалізацією, але водночас високоточного бортового радіопеленгатора, що визначає кутове положення джерел радіовипромінювання для подальшої автономної навігації БПЛА. **Метою статті** є створення високоточного методу комплексування вимірювань в бортовому радіопеленгаторі, розташованого на крилатих БПЛА з автономним наведенням, надання практичних рекомендацій з його алгоритмічної реалізації та проведення апробації основних операцій обробки сигналів методами імітаційного моделювання. **Завдання дослідження** включають: 1) аналіз статистичної теорії оптимізації алгоритмів обробки сигналів у радіовимірвальних системах; 2) розробку алгоритмів пеленгації джерел радіовипромінювання, здатних забезпечувати високу точність у широкому діапазоні кутів спостереження; 3) синтез структурної схеми радіопеленгатора; 4) імітаційне моделювання основних алгоритмічних операцій та оцінка точності вимірювання кутового положення. **Отриманий результат:** підтверджено теоретичні розробки методу, що за рахунок комплексування вимірювань з двоантенного амплітудного пеленгатора з вузькими діаграмами, двоантенного пеленгатора з широкими діаграмами і двоантенного фазового пеленгатора здатен подолати протиріччя між високою точністю і широким діапазоном однозначних вимірювань. **Галузь застосування:** отримані результати є теоретичним підґрунтям для подальших експериментальних розробок радіопеленгаторів різного призначення, розкривають теоретичні основи синтезу методів комплексування вимірювань в радіосистемах різного призначення, а також сприяють підвищенню автономності польотів крилатих БПЛА.

Ключові слова: радіопеленгатор, статистичний синтез алгоритмів, комплексування вимірювань, імітаційне моделювання.

Вступ

Актуальність. Одним із радіотехнічних засобів, яким має бути обладнаний кожен сучасний аеродром, є привідна аеродромна радіостанція [1]. Завданням приводних радіостанцій є приведення літаків та вертольотів у район аеродрому, виконання передпосадкового маневру, витримування напрямку вздовж осі злітно-посадкової смуги. Нині в авіації використовують приводні радіостанції різних модифікацій та компаній [2], а сама проблема приведення літального апарату в задану точку досліджується вже багато років. З розвитком безпілотної авіації, її впровадженням у роботу систем доставки вантажів, передачі даних на великі відстані, спостереження за великими ділянками простору також стало актуальним питання приведення БПЛА в зону їх функціонування [3] або їх автономне повернення на стартову ділянку [4]. При цьому створення системи пеленгації радіомаяків з борта БПЛА та систем керування польотом БПЛА має свої особливості.

В порівнянні з літаком чи вертольотом БПЛА має обмежені габаритні розміри для розміщення апаратури та складні конструктивні особливості побудови несучої конструкції. Частоти керування та обміну даними з безпілотною апаратами мають велику варіабельність та не узгоджені з аеродромами. Точка вильоту та приземлення БПЛА не обладнується спеціальними спорудами або технічними засобами. Ціна бортового радіоелектронного обладнання стрімко зростає і все частіше перевищує ціну носія.

З огляду на вказані особливості актуальним стає задача створення бортового радіопеленгатора, що вбудовується в конструкцію БПЛА, має високу точність

та широкий діапазон кутів однозначного вимірювання напрямків на радіомаяки, характеризується невеликими масо-габаритні пара-метрами та простотою реалізації.

Досвід розробок за темою. Для приведення літальних апаратів в точку випромінювання радіо-маяка в першу чергу виконують вимірювання кутового положення джерела радіовипромінювання. Для оцінки напрямку зазвичай використовують радіопеленгатори на основі порівняння амплітуд [5], вимірювання часу затримки [6], оцінки просторового спектру [7], інтерферометричної обробки сигналів [8], доплерівського зсуву частоти [9]. Розглянемо їх більш детально.

Принцип роботи амплітудних радіопеленгаторів полягає в порівнянні амплітуд прийнятих сигналів, що пропорційні просторовим характеристикам приймальних антен у напрямку, де знаходиться джерело радіовипромінювання. Основні етапи обробки сигналів при пеленгації зрозумілі і радіовимірвачі мають відносно просто реалізуються, невеликий розмір, малу вагу і низьку ціну. Серед недоліків необхідно відзначити низьку точність вимірювання кутового положення, залежність вимірювань від поляризації та викривлення хвильового фронту радіохвиль.

Інтерферометричні пеленгатори ґрунтуються на вимірюваннях різниці фаз між двома рознесеними у просторі антенами, що прийняли сигнал від точкового джерела радіовипромінювання. Такого типу пеленгатори широко використовуються на практиці і виготовляються закордонними компаніями. Перевагами фазових пеленгаторів є простота реалізації антенної системи та алгоритму отримання відліку пеленгу, а також стійкість до паразитної амплітудної модуляції. До недоліків слід віднести складність реалізації приймача з повністю ідентичними за фазовими

характеристиками трактами та вузький діапазон кутів однозначних вимірювань.

Різновидом інтерферометричного пеленгатору є кореляційно-інтерферометричний [10], що використовує для вимірювання кута кільцеву антенну решітку з послідовною комутацією антенних елементів та алгоритми кореляційної обробки вимірних комплексних амплітуд на антенних парах. До переваг відносять високу чутливість і високу точність пеленгації, проте ціна реалізації багатоканальних приймачів та складність обробки сигналів в цифрових процесорах робить неможливим широке застосування кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів.

В доплерівських пеленгаторах вимірюється зсув частоти Доплера, що утворюється в результаті руху або обертання приймальної антени. Найвищий ефект від цього методу досягається, коли антена повністю переміщується в напрямку хвилі, що приходить. Доплерівська пеленгація зазвичай не передбачає прямого обертання пеленгаторної антени, оскільки це важкодосяжно в техніці. Він полягає у встановленні кількох антен по колу концентричних кіл, і електронний перемикач швидко підключає кожну антену в послідовності, що еквівалентно обертанню пеленгатора до антени. Доплерівські радіопеленгатори мають високу чутливість, високу точність, слабку залежність від поляризації хвиль, не чутливі до спотворення хвильового фронту. Недоліком доплерівської системи пеленгації є низька ефективність боротьби з інтерференційними перешкодами. Система все ще перебуває на стадії розробки, її вдосконалення призведе до ускладнення системи, а вартість, відповідно, зросте.

Точність фазової пеленгації обернено-пропорційна до відстані між антенами пеленгатору, але максимальний розмір обмежений довжиною хвилі електромагнітних хвиль, що вимірюються. Для подолання цього протиріччя використовуються пеленгатори з великою базою, але вимірювальним параметром стає час затримки замість зсуву фаз. Перевагами таких систем є висока точність, нечутливість до поляризації, відсутність неоднозначності вимірювань. До недоліків слід віднести великі відстані рознесення вимірювачів та необхідність використовувати сигнали з певним типом модуляції.

Радіопеленгатори, що дають оцінку просторового положення за результатами вимірювання просторового спектру прийнятих сигналів складаються з набору антен і багатоканальних когерентних приймачів, що реєструють амплітуди і фази прийнятих сигналів. Подальша обробка вектору вимірювань виконується в цифровому процесорі методами кореляційного аналізу. Технологія просторової оцінки спектру може реалізувати одночасну пеленгацію кількох джерел випромінювання, сигнали яких існують в одному каналі в один і той же час, Також можлива реалізація пеленгації з надроздільною здатністю. Для точного визначення напрямку потрібна лише невелика кількість зразків сигналу, тому такий метод підходить для пеленгації сигналів зі стрибками частоти. В цілому можна стверджувати, що має місце висока чутливість, висока точність, антена решітка може бути реалізована з використанням елементів будь-якої

спрямованості та вимоги до точності положення цих елементів не високі. Перелічені вище переваги пеленгаторів з просторовою оцінкою спектру вирішують проблеми, які тривалий час існували в раніше розглянутих методах. Дані пеленгатори вимагають широко-смугових входних трактів, а також узгодженості електричних характеристик кожного елемента антенної решітки та багатоканальних приймачів. Крім того, для вирішення практичних завдань необхідні високопродуктивні обчислювальні процесори.

Постановка задачі. Виходячи з проведеного аналізу поточних наукових досліджень та наведених протиріч впливає актуальна наукова проблема проектування радіопеленгатору, що має невеликі масо-габаритні характеристики або вбудовується в конструкцію БПЛА, здатен вимірювати кутові положення джерела радіовипромінювання з високою точністю і у широкому діапазоні кутів, простий і дешевий у реалізації.

Для досягнення визначеної задачі необхідно вирішити наступні часткові завдання:

- 1) проаналізувати теоретичні підходи до статистичного синтезу оптимальних алгоритмів пеленгації,
- 2) розробити простий у реалізації і точний метод пеленгації джерел радіовипромінювання у широкому діапазоні кутів однозначних вимірювань,
- 3) розробити структурну схему оптимального бортового вимірювача напрямків на радіомаяки,
- 4) виконати імітаційне моделювання основних алгоритмічних операцій і оцінити точність радіопеленгатора з комплексною обробкою сигналів.

Теоретичні основи структурного синтезу радіовимірювальних систем

Для розв'язання оптимізаційних задач синтезу алгоритмі обробки сигналів в багатоканальних радіопеленгаторах будемо використовувати статистичну теорію оптимізації радіотехнічних систем дистанційного зондування та радіолокації. Згідно цієї теорії для вирішення зазначеної проблеми доцільно використовувати метод максимуму функції правдоподібності. Сутність цього методу полягає в пошуку параметру λ , що максимізує функціонал правдоподібності $P[\bar{u}(t) | \lambda]$ [11, 12] – умовний функціонал щільності ймовірності випадкового процесу $\bar{u}(t)$ при фіксованому значенні параметра λ . Замість функціоналу $P[\bar{u}(t) | \lambda]$ частіше максимізують його логарифм, так як функція логарифму є монотонною і не змінює точку максимуму $P[\bar{u}(t) | \lambda]$. Для знаходження оптимальних оцінок параметра λ необхідно розв'язати систему рівнянь

$$\left. \frac{d \ln P[\bar{u}(t) | \lambda]}{d \lambda} \right|_{\lambda=\lambda_{true}} = 0. \quad (1)$$

де $\frac{d}{d \lambda}$ – оператор похідної, яка береться в точці істинного значення λ_{true} параметра λ , $\bar{u}(t)$ – рівняння спостереження, що включає спотворені шумом приймача прийняті корисні сигнали. Загальний вигляд рівнянь спостереження в багатоантенних

радіопеленгаторах при оцінюванні напрямку на джерело радіовипромінювання θ_s є наступний

$$\vec{u}(t) = \text{Re}\{\dot{\vec{s}}(t, \theta_s)\} + \vec{n}(t), \quad (2)$$

де $\vec{u}(t) = \|u_1(t), u_2(t), \dots, u_N(t)\|$, (3)

$\text{Re}\{\cdot\}$ – оператор дійсної частини вектору прийнятих корисних комплексних сигналів $\dot{\vec{s}}(t, \theta_s)$,

$$\dot{\vec{s}}(t, \theta_s) = \|\dot{s}_1(t, \theta_s), \dot{s}_2(t, \theta_s), \dots, \dot{s}_N(t, \theta_s)\|, \quad (4)$$

$$\dot{s}_i(t, \theta_s) = K_{0i} \int_{\Theta} \dot{G}_i(\theta - \theta_{0i}) \delta(\theta - \theta_s) \dot{A}(t) e^{-j2\pi f_0 t} e^{j\psi_i(\theta_s)} d\theta, \quad (5)$$

$\psi_i(\theta_s) = 2\pi f_0 \Delta r_i(\theta_s) c^{-1}$ – фазовий зсув сигналу в кожному приймальному каналі відносно фазового центру поля антен, $\Delta r_i(\theta_s)$ – різниця відстаней, що проходять електромагнітні хвилі від джерела до кожної антени, $\delta(\theta - \theta_s)$ – дельта-функція, що визначає просторове положення точкового джерела радіовипромінювання у напрямку θ_s , K_{0i} – коефіцієнт підсилення i -го приймального каналу, $\dot{G}_i(\theta - \theta_{0i})$ – діаграма спрямованості i -ї антени, що орієнтована своїм максимумом у напрямку θ_{0i} , $\dot{A}(t)$ – комплексна обвідна сигналу, що випромінюється джерелом, $e^{-j2\pi f_0 t}$ – гармонійне коливання у комплексній формі з несучою частотою f_0 , t – час, θ – координати кутів, c – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль, $i = 1, \overline{N}$,

$$\vec{n}(t) = \|n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t)\| \quad (6)$$

– внутрішні шуми.

Геометрія, що лягла в основу моделі (5), показана на рис. 1. З цієї моделі випливає, що вхідні тракти відрізняються лише коефіцієнтами підсилення K_{0i} .

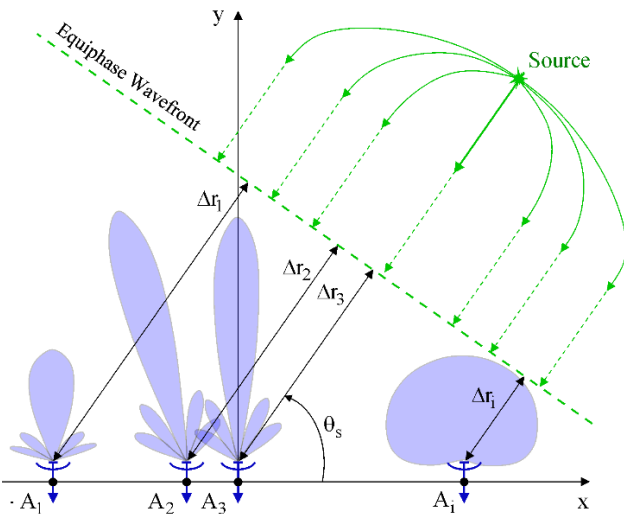


Рис. 1. Загальна геометрія вимірювань у радіопеленгаторах

Внутрішні шуми в приймальних трактах $n_i(t)$ будемо вважати білими гаусівськими шумами, що взаємно не корельовані, проте мають однакову спектральну щільність потужності $0,5N_0$. Кореляційна функція внутрішніх шумів має вигляд

$$R_{n_i}(t_1 - t_2) = 0,5N_0\delta(t_1 - t_2), \quad (7)$$

де $\delta(t_1 - t_2)$ – дельта-функція.

Одним із найважливіших етапів розв'язання оптимізаційної задачі є визначення $P[\vec{u}(t) | \lambda]$. В [13] наведена методика конструювання функціоналів правдоподібності для широкого кола задач радіолокації та дистанційного зондування. В цьому дослідженні будемо використовувати функціонал правдоподібності наступного вигляду:

$$P[\vec{u}(t) | \lambda = \theta_s] = \kappa \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^N \int_T [u_i(t) - \text{Re}\{\dot{s}_i(t, \theta_s)\}]^2 dt \right\}, \quad (8)$$

де κ – коефіцієнт, що не залежить від параметрів, що підлягають оцінюванню, T – час спостереження. Параметр $\lambda = \theta_s$ є постійною величиною.

Підставляючи (8) в (7), отримаємо систему рівнянь правдоподібності

$$\frac{2}{N_0} \sum_{i=1}^N \int_T [u_i(t) - \text{Re}\{\dot{s}_i(t, \theta_s)\}] \text{Re}\left\{ \frac{d\dot{s}_i(t, \theta_s)}{d\theta_s} \right\} dt = 0$$

$$\sum_{i=1}^N \int_T u_i(t) \text{Re}\left\{ \frac{d\dot{s}_i(t, \theta_s)}{d\theta_s} \right\} dt =$$

$$\sum_{i=1}^N \int_T \text{Re}\{\dot{s}_i(t, \theta_s)\} \text{Re}\left\{ \frac{d\dot{s}_i(t, \theta_s)}{d\theta_s} \right\} dt. \quad (9)$$

Ліва частина (9) визначає основні оптимальні операції, що необхідно виконати над прийнятими коливаннями $u_i(t)$ в кожному каналі. Ліву частину необхідно порівняти з правою частиною. Права частина – це пеленгаційна характеристика багатоканального радіопеленгатора, що показує реакцію вимірювача на зміну кутового положення джерела випромінювання θ_s .

Визначивши умови проведення вимірювань та тип радіопеленгатора, або комбінацію декількох, можливо синтезувати оптимальний алгоритм пеленгації джерел радіовипромінювання. Виконаємо таку оптимізацію структури радіопеленгатора з урахуванням визначеної наукової проблеми.

Оптимальний метод високоточної пеленгації джерел радіовипромінювання у широкому діапазоні кутів однозначних вимірювань

Для статистичного синтезу методу обробки сигналів в радіопеленгаторі, що задовольняє суперечливим вимогам – невеликі масо-габаритні характеристики та ергономічне розміщення на борту, висока точність, широкий діапазоні кутів однозначних вимірювань, проста реалізація, низька ціна, будемо використовувати комбінацію наступних трьох радіо-

пеленгаторів: амплітудного радіопеленгатору з широкоспрямованими антенами, амплітудного радіопеленгатору з вузькоспрямованими антенами, фазового радіопеленгатору з всеспрямованими антенами. Геометрія вимірювань показана на рис. 2.

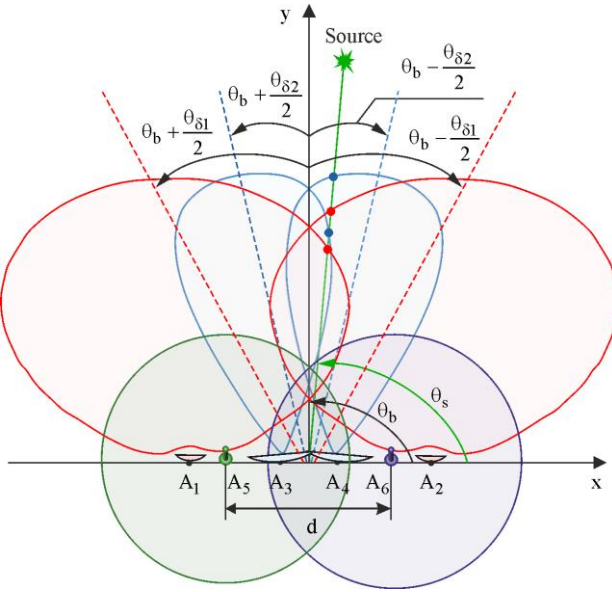


Рис. 2. Геометрія вимірювань в шестиантенному пеленгаторі

Корисні сигнали мають такі моделі:

$$\begin{aligned} \dot{s}_1(t, \theta_s) &= \\ &= K_{01} \int_{\Theta} G_1(\theta - \theta_b - 0,5\theta_{\delta 1}) \delta(\theta - \theta_s) \dot{A}(t) e^{-j2\pi f_0 t} d\theta, \\ \dot{s}_2(t, \theta_s) &= \\ &= K_{02} \int_{\Theta} G_1(\theta - \theta_b + 0,5\theta_{\delta 1}) \delta(\theta - \theta_s) \dot{A}(t) e^{-j2\pi f_0 t} d\theta, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left. \frac{dG_1(\theta - \theta_b - 0,5\theta_{\delta 1})}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_s} K_{01} \int_T u_1(t) \dot{h}(t) dt + \left. \frac{dG_1(\theta - \theta_b + 0,5\theta_{\delta 1})}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_s} K_{02} \int_T u_2(t) \dot{h}(t) dt + \\ & + \left. \frac{dG_2(\theta - \theta_b - 0,5\theta_{\delta 2})}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_s} K_{03} \int_T u_3(t) \dot{h}(t) dt + \left. \frac{dG_2(\theta - \theta_b + 0,5\theta_{\delta 2})}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_s} K_{04} \int_T u_4(t) \dot{h}(t) dt - \\ & - G_3(\theta_b) \sin(\theta_s - \theta_b) \times \left(\cos\left(\pi f_0 \frac{d \cos(\theta_s - \theta_b)}{c}\right) + j \sin\left(\pi f_0 \frac{d \cos(\theta_s - \theta_b)}{c}\right) \right) \times \\ & \times \left(j\pi f_0 d c^{-1} \right) K_{05} \int_T u_5(t) \dot{h}(t) dt + G_3(\theta_b) \sin(\theta_s - \theta_b) \times \left(j\pi f_0 d c^{-1} \right) K_{06} \int_T u_6(t) \dot{h}(t) dt \times \\ & \times \left(\cos\left(\pi f_0 \frac{d \cos(\theta_s - \theta_b)}{c}\right) - j \sin\left(\pi f_0 \frac{d \cos(\theta_s - \theta_b)}{c}\right) \right) = K_{01} \left. \frac{dG_1(\theta - \theta_b - 0,5\theta_{\delta 1})}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_s} \times \\ & \times G_1(\theta_s - \theta_b + 0,5\theta_{\delta 1}) \frac{1}{2} E_s + K_{02} \left. \frac{dG_1(\theta - \theta_b + 0,5\theta_{\delta 1})}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_s} G_1(\theta_s - \theta_b - 0,5\theta_{\delta 1}) \frac{1}{2} E_s + \\ & + K_{03} \left. \frac{dG_2(\theta - \theta_b - 0,5\theta_{\delta 2})}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_s} G_2(\theta_s - \theta_b + 0,5\theta_{\delta 2}) \frac{1}{2} E_s + K_{04} \left. \frac{dG_2(\theta - \theta_b + 0,5\theta_{\delta 2})}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_s} \times \end{aligned} \quad (11)$$

$$\dot{s}_3(t, \theta_s) =$$

$$= K_{03} \int_{\Theta} G_2(\theta - \theta_b - 0,5\theta_{\delta 2}) \delta(\theta - \theta_s) \dot{A}(t) e^{-j2\pi f_0 t} d\theta,$$

$$\dot{s}_4(t, \theta_s) =$$

$$= K_{04} \int_{\Theta} G_2(\theta - \theta_b + 0,5\theta_{\delta 2}) \delta(\theta - \theta_s) \dot{A}(t) e^{-j2\pi f_0 t} d\theta,$$

$$\begin{aligned} \dot{s}_5(t, \theta_s) &= K_{05} G_3(\theta_b) \dot{A}(t) e^{-j2\pi f_0 \left(t - \frac{1}{c} \frac{d \cos(\theta_s - \theta_b)}{2} \right)}, \\ \dot{s}_6(t, \theta_s) &= K_{06} G_3(\theta_b) \dot{A}(t) e^{-j2\pi f_0 \left(t + \frac{1}{c} \frac{d \cos(\theta_s - \theta_b)}{2} \right)}, \end{aligned} \quad (10)$$

де $G_1(\theta - \theta_b - 0,5\theta_{\delta 1})$ і $G_1(\theta - \theta_b + 0,5\theta_{\delta 1})$ – ідентичні за формою діаграми спрямованості широкоспрямованих антен, що рознесені у просторі на кут $\theta_{\delta 1}$ від рівносигнального напрямку θ_b , $G_2(\theta - \theta_b - 0,5\theta_{\delta 2})$ і $G_2(\theta - \theta_b + 0,5\theta_{\delta 2})$ – ідентичні за формою, але рознесені у просторі на кут $\theta_{\delta 1}$ від рівносигнального напрямку θ_b , діаграми спрямованості вузькоспрямованих антен, $G_3(\theta_b)$ – коефіцієнт підсилення антени фазового пеленгатору у напрямку θ_b , d – відстань між антенами фазового пеленгатору, що розміщені на одній лінії вздовж осі x .

В моделях сигналів (10), що спостерігаються в амплітудних пеленгаторах, відсутня інформація про фазовий зсув між антенами, а в фазових пеленгаторах навпаки – вся інформація про кутове положення джерела закладена в фазу і не може спостерігатися в амплітудних множниках. Підставляючи рівняння спостереження, що складаються з адитивної суміші корисних сигналів (10) та дельта-корельованих шумів (6), в нерівність (9), отримуємо

$$\times G_2(\theta_s - \theta_b - 0,5\theta_{\delta 2}) \frac{1}{2} E_s + (K_{06} - K_{05}) G_3^2(\theta_b) \sin(\theta_s - \theta_b) \left(\pi f_0 \frac{d}{c} \right) \frac{1}{2} E_s.$$

де $\dot{h}(t) = \dot{A}(t)e^{-j2\pi f_0 t}$ – коефіцієнт передачі оптимального фільтру, $E_s = \int_T |\dot{A}(t)|^2 dt$ – енергія сигналу, що випромінює джерело.

Ліва частина (11) показує оптимальні операції, що необхідно виконати на прийнятими сигналами $\dot{u}(t)$ в кожному приймальному каналі пеленгатору.. Перші чотири рівняння характеризують обробку в амплітудних пеленгаторах. В кожному каналі необхідно виконати узгоджену фільтрацію прийнятих спостережень у фільтрі з імпульсною характеристикою $\dot{h}(t)$. Далі результати фільтрації множаться на вагові коефіцієнти K_{0i} і крутизну діаграм спрямованості, що визначаються виразами

$$\left. \frac{dG_i(\theta - \theta_b \pm 0,5\theta_{\delta i})}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_s} = G'_i(\theta - \theta_b \pm 0,5\theta_{\delta i}) \Big|_{\theta=\theta_s}.$$

Так як криві однакових діаграм в межах лінійної ділянки навколо рівносигнального напрямку розміщені симетрично, то по суті крутизна матиме різні знаки і результатом обробки буде віднімання вимірних потужностей сигналів в різних каналах амплітудних пеленгаторів. П'ятий і шостий доданок дозволяють отримати оцінку кутового положення джерела радіовипромінювання з точністю реалізації фазових вимірювань. Основні операції наступні:

1) рівняння $u_5(t)$ $u_6(t)$ необхідно пропустити через фільтр, параметри якого узгоджені з комплексною обвідною і частотою сигналу випромінювача,

2) результат детектування на низькій частоті множаться нормуючі на коефіцієнти

$$G_3(\theta_b) \left(j\pi f_0 d c^{-1} \right) K_{06},$$

3) нормовані амплітуди необхідно обробити в квадратурному детекторі, що налаштований на вимірювання зсуву фази що виникає через відхилення джерела випромінювання від рівносигнальної зони.

Результати обробки перераховуються в кути за допомогою пеленгаційної кривої, що розраховується в правій частині (11). При заданих параметрах розміщення та орієнтації антен в пеленгаторі права частина (11) є функцією кута θ_s і за своєю фізичною сутністю може бути названа пеленгаційною характеристикою $\Psi(\theta_s)$. На основі отриманих оптимальних операцій доцільно розробити структурну схему радіопеленгатору і дослідити її роботу імітаційним моделюванням.

Розроблення структурної схеми оптимального бортового радіопеленгатору і її імітаційне моделювання

Проаналізувавши алгоритм (11) була розроблена структурна схема радіопеленгатору, що показана на рис. 3.

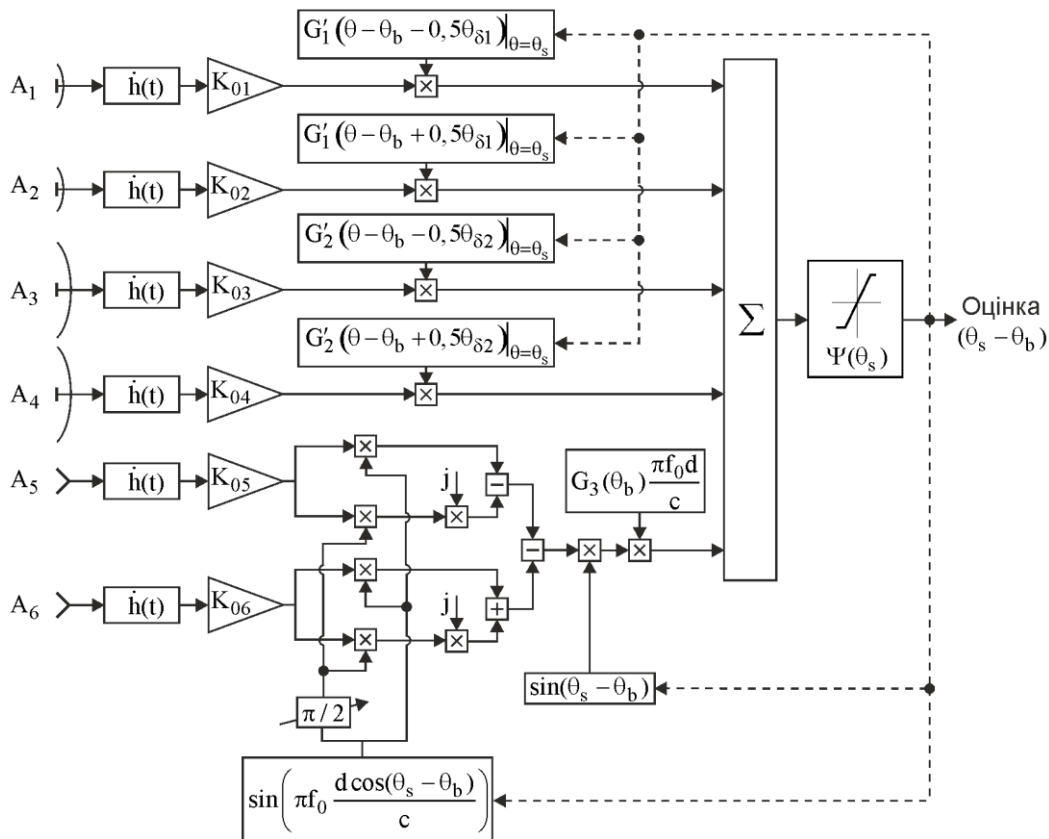


Рис. 3. Структурна схема оптимального шестиантенного бортового радіопеленгатору

Вона складається з шести антен, що реєструють електромагнітні коливання і перетворюють їх у високочастотні сигнали. Сигнали з кожної антени переносяться на проміжну частоту та когерентно детектується в фільтрі $\dot{h}(t)$, що налаштований на резонансну частоту f_0 і комплексну амплітуду $\dot{A}(t)$ сигналу джерела радіовипромінювання. Після детектування сигнали в першому, другому, третьому та четвертому каналах домножуються на крутизну діаграм спрямованості. Якщо вимірювання проводяться в межах лінійної ділянки діаграм, то крутизна буде постійною величиною, проте в загальному випадку блок формування значень

$$\left. \frac{dG_i(\theta - \theta_b \pm 0,5\theta_{\delta i})}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_s} K_{0i}$$

є функцією кута θ_s , що підлягає оцінюванню і постійному оновленню у вимірювачі.

В п'ятому та шостому каналах обробка більша складна, адже потребує визначення зсуву фаз в прийнятих сигналах, що обумовлені відхиленням джерела випромінювання від рівносигнального напрямку. Після когерентного детектування результати вимірювань множаться на коефіцієнти K_{0i} , де i – номер відповідного каналу, і задалегідь розраховані значення

$$\cos(\pi f_0 d \cos(\theta_s - \theta_b) c^{-1}), \sin(\pi f_0 d \cos(\theta_s - \theta_b) c^{-1}).$$

В каналах множення на функцію $\cos(\cdot)$ необхідно отримані значення додатково помножити на уявну одиницю j . В п'ятому каналі квадратурні компоненти віднімаються, а в шостому каналі навпаки – додаються. Результати обробки в шостому каналі віднімаються від результатів у п'ятому. Наступною операцією в розробленій структурній схемі є множення на величину $\sin(\theta_s - \theta_b)$ для виділення напруги, що відповідає значенню кута $\theta_s - \theta_b$. Результати оцінки в п'ятому та шостому каналі множаться на нормуючий множник $G_3(\theta_b)(\pi f_0 d c^{-1})$ та додаються до результатів вимірювань в перших чотирьох каналах. Отримані оцінки порівнюються з розрахованими значеннями дискримінаційної кривої $\Psi(\theta_s)$ (права частина нерівності (11)). Після отримання ненульового значення виміряні напруги подаються на керуючі рулі БПЛА для його приведення в зону випромінювання джерела радіосигналу. Після корекції напрямку процес вимірювання кутового положення повторюється.

Розроблена структурна схема радіопеленгатору була промодельована в програмі Simulink від компанії MathWorks в режимі потоку даних. Імітаційна модель показана на рис. 4. Імітаційна модель умовно складається з шести каналів обробки сигналів. На вхід кожного каналу подаються лінійно-змінні у часі значення кута від 0 до 180 градусів або фіксоване тестове значення $\theta_s = 97^\circ$. Подавати лінійно-змінне у часі значення кута необхідно для оцінки пеленгаційної характеристики $\Psi(\theta_s)$. Такі вимірювання проводяться в ідеальних умовах – при відсутності внутрішніх шумів.

В кожному каналі подаються однакові за статистичними характеристиками обмежені за спектром гаусівські шуми. Такі шуми генеруються блоком Band-Limited White Noise, що формує гаусівський шум з одиначною дисперсією, та блоками Clock, Gain. Останні потрібні для формування змінної у часі дисперсії шуму, що в подальшому буде використана для оцінки похибки пеленгації. Змінна у часі дисперсія внутрішніх шумів множиться на шум з одиначною дисперсією. Всі параметри блоків в кожному каналі налаштовані однаково, але при цьому параметр Seed в Band-Limited White Noise має різні значення для генерації некорельованих між каналами послідовностей.

Розглянемо більш детально канали формування та обробки сигналів. В кожному каналі є набір блоків формування несучого коливання у вигляді функції $\cos(2\pi f_0 t)$, що включає блок константи 2π , блок формування постійного значення 1 кГц, генератор часу t , блок формування фазового зсуву $\pi/2$ і блок тригонометричної функції $\sin(2\pi f_0 t)$.

П'ятий та шостий канали (рахувати зверху вниз) не мають фіксованого зсуву $\pi/2$, а додають до тригонометричної функції фазовий зсув обумовлений відхилення джерела випромінювання радіосигналу від рівносигнального напрямку.

Перші два канали описують сигнали в амплітудному пеленгаторі з широкоспрямованими антенами, третій та четвертий – в амплітудному пеленгаторі з вузькоспрямованими антенами, п'ятий та шостий – фазовий пеленгатор.

Інформація про кутове положення цілі в перших чотирьох каналах закладається в амплітудний множник у вигляді діаграми спрямованості. Діаграма спрямованості перших чотирьох антен закладена в блока A1, A2, A3, A4 у вигляді функції

$$G_i\left(\theta - \theta_b \pm \frac{\theta_{\delta i}}{2}\right) = a_i \exp\left(-\left(\theta - \theta_b \pm \frac{\theta_{\delta i}}{2}\right)^2 / (2\sigma_i^2)\right),$$

де $i = \overline{1,2}$, $\theta_b = 90^\circ$ – рівносигнальний напрямок, в перших двох антенах $\sigma_1 = 40$, $0,5\theta_{\delta 1} = 40$, $a_1 = 20$, наступні дві вузькоспрямовані антени мають параметри $\sigma_2 = 5$, $0,5\theta_{\delta 2} = 5$, $a_2 = 4$.

Значення обраного тестового кута або лінійно-змінні значення кута проходять блоки A1, A2, A3, A4 і множаться на високочастотний прийнятий сигнал. В даній імітаційній моделі центральна частота обрана у розмірі 1 кГц для спрощення моделювання, а реальні значення складають одиниці та десятки ГГц.

Сформовані у амплітудних і фазовому пеленгаторі корисні сигнали з закладеною інформацією про кутове положення додаються до внутрішніх шумів приймачів. Далі всі блоки присвячені обробці сигналів та оцінюванню пеленгу на джерело радіовипромінювання.

Перший блок обробки – це аналоговий фільтр, що налаштований на резонансну частоту сигналу. Цей фільтр відіграє роль узгодженого фільтру з імпульсною характеристикою $\dot{h}(t)$.

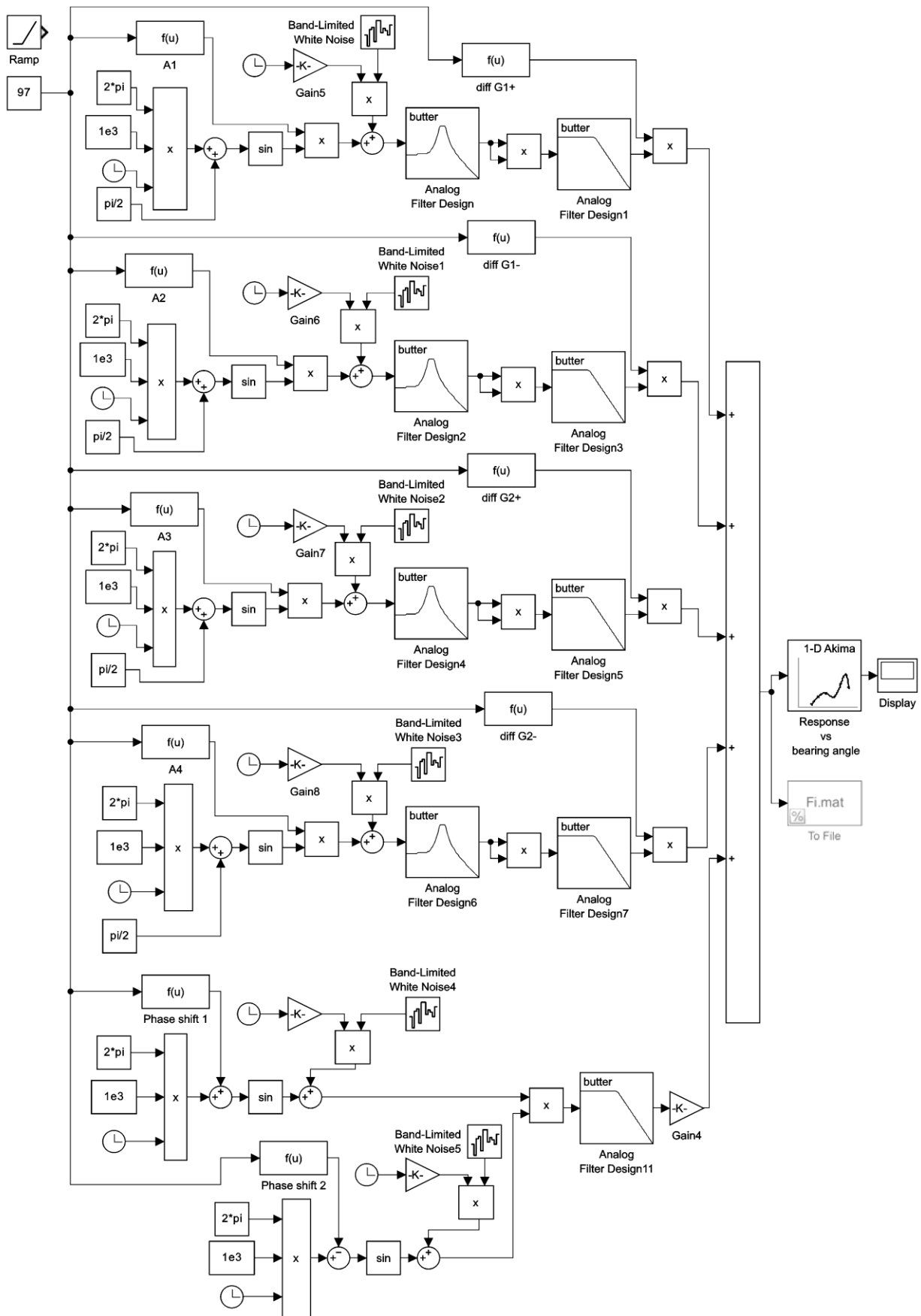


Рис. 4. Імітаційна модель бортового радіолокаційного комплексу високоточного пеленгування джерел радіовипромінювання

Наступною операцією в перших чотирьох каналах є квадратичне детектування амплітуди сигналу та

усереднення отриманих коливань в фільтрі нижніх частот, що реалізують операцію інтегрування в (11). Для

виділення корисної інформації з отриманих амплітуд в перших чотирьох каналах виконується множення коливань після фільтру нижніх частот на похідні від діаграм спрямованості кожного каналу. Реалізовані такі амплітуди у вигляді похідних від діаграм спрямованості у блоках diff G1+ (перший канал), diff G1- (другий канал), diff G2+ (третій канал) і iff G2- (четвертий канал). Результати множення додаються в суматорі всіх каналів.

В загальний суматор також подається напруга з фазового пеленгатору, що реалізується у п'ятому та шостому каналах. Корисні сигналів в суміші з шумами перемножуються та фільтруються в фільтрі нижніх час-

тот. В результаті виконання таких операцій некорельовані внутрішні шуми придушуються і оцінюється напруга, що пропорційна різниці фаз між каналами. Напруга змінюється за законом синуса в залежності від відхилення сигналу від рівносигнальної зони. Вплив на загальні вимірювання фазового пеленгатору корегується підсилювачем Gain4.

Результати додавання всіх амплітуд на першому етапі роботи моделі записуються в файл Fi.mat при встановлених нульових значеннях дисперсії внутрішніх шумів. Отримані записи в файл є оцінками пеленгаційної характеристики $\Psi(\theta_s)$. На рис. 5 проказані $\Psi(\theta_s)$ для чотирьох типів пеленгаторів.

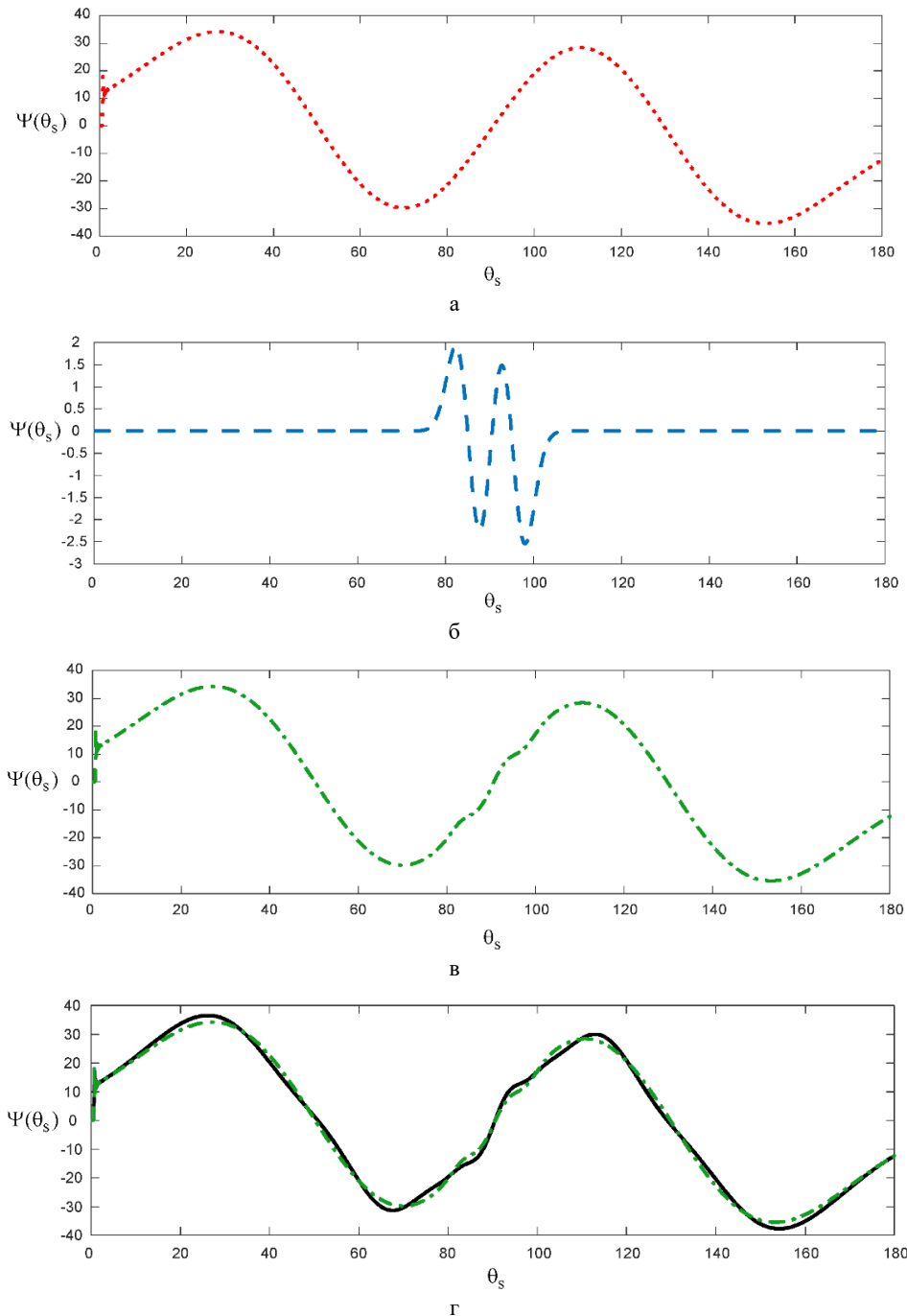


Рис. 5. Пеленгаційні характеристики різних типів пеленгаторів:

а – амплітудний пеленгатор з вузькоспрямованими антенами, б – амплітудний пеленгатор з широкоспрямованими антенами, в – комбінація двох амплітудних пеленгаторів, г – двох амплітудних і фазового пеленгаторів

На рис. 5 позначено:

- перша пунктирна червона крива показує пеленгаційну характеристику амплітудного пеленгатору з широкоспрямованими антенами,
- друга штрихова синя крива – амплітудного пеленгатору з вузькоспрямованими антенами,
- третя штрих-пунктирна зелена крива – комбінацію двох перших пеленгаторів,
- четверта суцільна чорна крива – амплітудних пеленгаторів і фазового пеленгатору при їх роботі в комплексі.

З отриманих пеленгаційних характеристик слідуює, що комбінований пеленгатор з двох амплітудних і одного фазового пеленгаторів має найширший діа-

пазон однозначних вимірювань, так як має найширший діапазон навколо рівносигнального напрямку де крива є монотонно зростаючою.

До недоліків необхідно віднести різні значення крутизни дискримінаційної кривої у межах однозначних вимірювань, що матиме різні показники точності для різних кутів.

В той самий час бачимо, що точність збільшується з наближенням до рівносигнального напрямку.

Для оцінки точності були виміряні значення кута 97 градусів при різних дисперсіях внутрішніх шумів приймачів. Результати моделювання вимірювань показані на рис. 6.

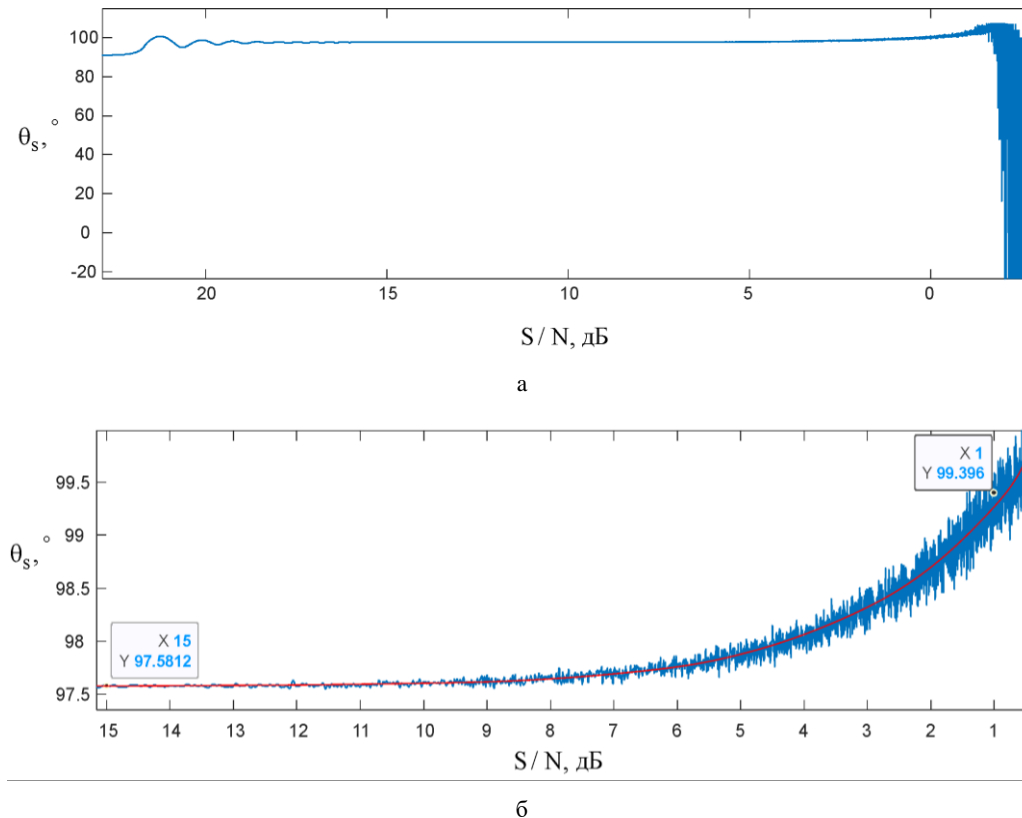


Рис. 6. Вимірювання фіксованого значення кута в залежності від співвідношення сигнал-завада: а – діапазон значень від 28 до 0,5 дБ за потужністю, б – збільшена ділянка найбільш типового випадку співвідношення сигнал-завада у радіолокації

За віссю ординат відкладено значення виміряного кута, а за віссю абсцис зміна співвідношення сигнал-завада за потужністю у дБ.

На початку першого графіка спостерігаються пульсації вимірювань – це перехідний процес в аналогових фільтрах, що використані в імітаційній моделі.

В кінці першої кривої спостерігаються значні спотворення вимірювань, що обумовлені високою дисперсією внутрішнього шуму.

На другому графіку виділено найбільш типовий діапазон значень співвідношень-сигнал завада у радіолокації.

При значення більше 13 дБ спостерігається лише зсув оцінки на 0,5812 градуси від заданого і дисперсія розкиду на декілька порядків менша від цього

значення. По мірі зменшення співвідношення сигнал-завада спостерігається зсув оцінки і збільшення розкиду значень.

З аналіз отриманих результатів імітаційного моделювання слідуює працездатність запропонованого методу, можливість досягнення нових критеріїв якості в запропонованому комплексі і загальна відповідність отриманих оцінок кутового положення відомим випадкам вимірювань в присутності завад.

Далі отримані теоретичні методи та імітаційне моделювання в режимі потоку даних підтвердити експериментами.

Для цього спочатку необхідно спроектувати та розробити серію приймальних антен радіопеленгаторів, що здатні працювати відокремлено і в комплексі.

Висновки

Запропонований комбінований пеленгатор, який об'єднує два амплітудних і один фазовий пеленгатор, демонструє найширший діапазон однозначних вимірювань. Це забезпечує надійність роботи системи в широкому діапазоні кутів спостереження. Хоча комбінований пеленгатор має найширший діапазон, різна крутизна дискримінаційної кривої в межах цього діапазону призводить до різної точності для різних кутів.

Однак, точність збільшується з наближенням до рівносигнального напрямку. Під час моделювання було показано, що зменшення співвідношення сигнал-завада призводить до зсуву оцінки та збільшення розкиду значень кутів. В той самий час мінімальним співвідношенням, після якого спостерігається

стрімке погіршення оцінок кутового положення, складає 13 дБ. Отримана величина є фізично досяжною при створенні радіопеленгатору на сучасній елементній базі.

За результатами імітаційного моделювання підтверджується працездатність запропонованого методу, що дозволяє досягати нових критеріїв якості в комплексі вимірювань і є важливим для подальшої розробки і експериментальної перевірки радіопеленгаторів.

Фінансування

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України, за сприяння Кембриджського університету (Велика Британія), державний реєстраційний номер проекту 0124U003671.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Johnson, R., Smith, L. Aviation Navigation Systems: Air-Ground and Onboard Equipment. *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.* 2019, 34, 45-58. doi:10.1109/MAES.2019.8816743
2. Brown, J., Davis, K. Advances in Aircraft Radio Systems. *Sensors* 2020, 20, 2564. doi:10.3390/s20092564
3. Thompson, G., Liu, M. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): Applications and Control. In *Advances in Unmanned Aerial Vehicles: Applications and Control*; Springer: Cham, Switzerland, 2021; pp. 15-35. doi:10.1007/978-3-030-50539-7_2
4. Singh, K.P.; Kumar, M.B.; Patel, R.G. Autonomous Landing of Unmanned Aerial Vehicles Using Radio Beacons. *J. Aerospace Eng.* 2022, 35(4), 04021014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0001365](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001365)
5. Williams, D., O'Connell, P. Amplitude Comparison Direction Finding Systems for Modern Radar Applications. *Int. J. Microw. Wirel. Technol.* 2021, 13, 125-138. doi:10.1017/S1759078720001530
6. Li, Y.; Liu, W.; Zhang, X. Time Delay Estimation for Direction Finding in Radar Systems. *IEEE Trans. Signal Process.* 2022, 70, 3054-3065. doi:10.1109/TSP.2022.3154778
7. Nguyen, A., Zhang, Q. Spatial Spectrum Estimation Techniques in Radar and Communication Systems. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2022, 24, 654-671. doi:10.1109/COMST.2022.3174761
8. Kumar, V., Patel, R. Interferometric Techniques in Modern Radar Systems. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2022, 70, 985-999. doi:10.1109/TAP.2022.3141859
9. Andersson, P., Wilson, H. Doppler Direction Finding: Techniques and Challenges. *J. Electromagn. Waves Appl.* 2021, 35, 1367-1382. doi:10.1080/09205071.2021.1902347
10. Garcia, M., Lee, J. Correlation-Interferometric Direction Finding in Complex Environments. *Electronics* 2023, 12, 1123. doi:10.3390/electronics12051123
11. Volosyuk, V.; Zhyla, S. Statistical Theory of Optimal Functionally Deterministic Signals Processing in Multichannel Aerospace Imaging Radar Systems. *Computation* 2022, 10, 213. <https://doi.org/10.3390/computation10120213>
12. Volosyuk, V.; Zhyla, S. Statistical Theory of Optimal Stochastic Signals Processing in Multichannel Aerospace Imaging Radar Systems. *Computation* 2022, 10, 224. <https://doi.org/10.3390/computation10120224>
13. Volosyuk, V.K.; Kravchenko, V.F. *Statisticheskaya Teoriya Radiotekhnicheskikh Sistem Distantionnogo Zondirovaniya i Radiolokatsii. Fiziko-Matematicheskaya Literatura: Moscow, Russia, 2008; 704 p.*

Received (Надійшла) 22.05.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.10.2024

Combining measurements in the airborne direction finder as part of the uav autonomous navigation system

E. Tserne, C. Zhyla, A. Popov, Ye. Volkov, S. Shevchuk, O. Hrybskyi, D. Vlasenko, V. Kosharskyi, D. Kovalchuk

Abstract. The article is devoted to the development of a method of operation of an inexpensive, simple in realization, but at the same time highly accurate on-board direction finder that determines the angular position of radio emission sources for further autonomous navigation of UAVs. The aim of the article is to create a high-precision method of complexing measurements in the onboard direction finder located on autonomous guided UAVs, to provide practical recommendations for its algorithmic implementation and to carry out approbation of the main signal processing operations by simulation modeling methods. The objectives of the research include: 1) analysis of the statistical theory of optimization of signal processing algorithms in radio measurement systems; 2) development of algorithms for direction finding of radio sources capable of providing high accuracy in a wide range of observation angles; 3) synthesis of the structural scheme of the direction finder; 4) simulation modeling of the main algorithmic operations and evaluation of the accuracy of angular position measurement. Obtained result: theoretical developments of the method are confirmed, which due to the complexing of measurements from two-antenna amplitude direction finder with narrow diagrams, two-antenna direction finder with wide diagrams and two-antenna phase direction finder is able to overcome the contradiction between high accuracy and wide range of unambiguous measurements. Field of application: the obtained results are a theoretical basis for further experimental development of radio direction finders for various purposes, reveal the theoretical basis for the synthesis of methods of complexing measurements in radio systems for various purposes, and also contribute to improving the autonomy of flights of UAVs.

Keywords: direction finder, statistical synthesis of algorithms, complexing of measurements, simulation modeling.

Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 656.051

doi: 10.26906/SUNZ.2024.4.021

П. Ф. Горбачов, Є. В. Любий

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

КРИТЕРІЙ ВКЛЮЧЕННЯ РЕГУЛЬОВАНОГО ПЕРЕХРЕСТЯ В ПЛАН ПРОСТОРОВОЇ КООРДИНАЦІЇ

Анотація. Стаття містить результати опису і обґрунтування кількісного критерію розширення плану просторової координації на ділянках міської вулично-дорожньої мережі. Використання запропонованого критерію дозволяє робити висновки про доцільність включення додаткового регульованого перехрестя до просторової координації на підставі даних про інтенсивності транспортного потоку на ділянках вулично-дорожньої мережі, що досліджується. Розроблений критерій відповідає прийнятій методиці розрахунку тривалості світлофорного циклу, яка ґрунтується на формуванні пачок зеленої хвилі у кожному напрямі руху ділянками вулично-дорожньої мережі міста. Наступними етапами дослідження в цьому напрямку є розробка імітаційної моделі плану просторової координації на ділянці вулично-дорожньої мережі та експериментальна перевірка працездатності запропонованого критерію включення додаткового регульованого перехрестя в план координації.

Ключові слова: зелена хвиля, інтенсивність, пачка автомобілів, план просторової координації, регульоване перехрестя.

Вступ

Постановка завдання. Основною метою цієї статті є отримання кількісного критерію, що дає відповідь на запитання: де доцільно провести межу об'єкта просторової координації? Або інакше, на якому перехресті зупиниться при розширенні області координації? Відповіддю на це запитання в сучасній науковій і методичній літературі з організації дорожнього руху (ОДР) слугують суб'єктивні оцінки відстані від включеного в координацію регульованого перехрестя (РП) до сусіднього РП (щодо якого розглядають питання його включення в координацію), що ґрунтуються на інтуїтивних міркуваннях їхніх авторів щодо процесу розпаду пачки зеленої хвилі (ЗХ) у процесі її руху [1–5].

Прийнято вважати, що чим більша відстань між сусідніми РП, тим менше сенсу в координації роботи цих двох перехресть між собою, тому що в разі стаціонарного або рівномірного потоку прибуття ефективнішим є індивідуальне налаштування світлофорного циклу (СЦ) на транспортні потоки (ТП), що входять у перехрестя.

Таке налаштування полягає в призначенні раціональної тривалості СЦ і його окремих фаз, які забезпечують мінімум середнього часу затримки транспортних засобів (ТЗ) на перехресті за рахунок мінімізації часу очікування ввімкнення дозволяючого сигналу для кожного напрямку.

Але не тільки суб'єктивний характер оцінок критичної довжини перегону і, як наслідок, великий розкид її значень є перешкодами для обґрунтованого прийняття рішень щодо меж координації. Збільшення довжини пачки ЗХ насправді не є перешкодою для координації, оскільки навіть за таких умов вчасне ввімкнення дозволяючого сигналу, орієнтоване не на

найшвидші автомобілі в ній, може суттєво скоротити середній час очікування можливості проїзду через перехрестя, у порівнянні з адаптацією в режимі реакції на прибуття ТЗ (vehicle actuated) [6], не кажучи вже про опосередкований режим реакції на інтенсивність ТП (traffic actuated) [7].

Це твердження підтверджується одним із базових методів координації TRANSYT, що спирається на циклічні профілі потоків, які не вимагають наявності в них щільної пачки [8]. Цей метод забезпечує приблизно таку саму ефективність, як і альтернативний базовий метод максимізації ширини коридору для координованих ТЗ [9], що передбачає наявність щільної пачки в потоці.

Обидва методи експлуатуються вже більше 60-ти років і продемонстрували свою працездатність, що свідчить про можливість ефективної координації роботи світлофорів навіть за відсутності щільних пачок ТЗ у потоці.

Але найбільша проблема стандартного підходу до вирішення питання про доцільність координації полягає в тому, що перелік чинників, які визначають параметри вхідного потоку, насправді не обмежуються довжиною перегону між світлофорами, особливо в міських умовах, де координація є найактуальнішою і потенційно максимально ефективною. У просторовій, і дещо менше в лінійній, координації джерелами формування ТП найчастіше виступають не одне РП, а кілька перетинів ділянки вулично-дорожньої мережі (ВДМ), яка підходить до перехрестя, з іншими вулицями, виїздами з дворів, паркувань тощо.

Вони можуть кардинально змінити параметри ТП на перегоні перед РП і зробити координацію недоцільною, навіть якщо відстань до сусіднього РП є відносно невеликою. Можливі також й інші ситуації,

що призводять до порушення умов, придатних для координації, наприклад, наявність значного поворотного ТП з потенційно другорядного напрямку, який за величиною можна порівняти з ТП на основному напрямі координації.

Описувати всі можливі випадки, що призводять до аналогічних результатів з погляду властивостей ТП, що входить у перехрестя, сенсу немає, внаслідок необмеженої кількості варіантів дорожніх ситуацій, тут тільки важливо прийняти, що ключовим параметром під час визначення доцільності внесення чергового РП до плану просторової координації є ТП, який прибуває з його боку до вже внесеного в координацію перехрестя.

Виклад основного матеріалу

Під час визначення критеріїв включення РП до координації слід виходити з того, що спільна робота сусідніх світлофорів стає доцільною тоді, коли вона дає змогу зменшити середній час очікування дозвольного сигналу для автомобілів, що прибувають до координованого перехрестя, порівняно зі світлофорним регулюванням на ньому за допомогою постійного оптимального СЦ або, можливо, порівняно з адаптивним світлофором. Повністю розв'язати таку задачу в аналітичному вигляді поки що не є можливим, через відсутність надійних аналітичних оцінок затримок ТЗ на РП, проте можна знайти оцінки потенційної придатності вхідного ТП для координації, використовуючи його характеристики, які опосередковано відображають циклічність процесу прибуття автомобілів до перехрестя.

У найзагальнішому випадку, це питання постає вже на початку процесу формування об'єкта просторової координації, за наявності одного РП як потенційного об'єкта для координації, хоча, найімовірніше, початок цього процесу визначатиметься декількома близько розташованими РП, доцільність координації яких є очевидною априорі. Для проведення меж об'єкта тоді необхідно розглянути всі РП, які є сусідніми з уже включеними до координації перехрестями, і оцінити потенційні можливості, які створює його включення до координації на підставі характеристик ТП між ними.

Така постановка задачі передбачає проведення обстеження ТП на невеликій відстані перед РП, у якому фіксується моменти перетину переднім бампером ТЗ поперечного зрізу дороги.

Відстань між зрізом і перехрестям має бути якомога меншою, але достатньо великою для того, щоб черга ТЗ перед ним не впливала на результати обстеження, тобто не відображалася на інтервалах проїзду ТЗ повз зріз.

Крім того, бажано, щоб на ділянці між зрізом і перехрестям не було незначних джерел появи ТЗ (виїздів із дворів і паркувань) і обов'язково не повинно бути нерегульованих примикань другорядних вулиць.

Тривалість обстеження має становити щонайменше годину, яка розбивається на 15-хвилинні інтервали, прийняті як орієнтир стабільності ТП у НСМ 2010 [10] та інших методичних документах.

Вона надалі позначається T_s , с, кількість зафіксованих за час спостереження ТЗ – N_s , кількість зафіксованих інтервалів між ними – N , $N = N_s - 1$.

Відмінним параметром різних варіантів прибуття є інтервал прибуття, а оскільки це випадкова величина, то вона має певні параметри і закон розподілу.

Найбільш інформативними з параметрів є математичне сподівання (середнє значення) інтервалу прибуття M і його стандартне відхилення σ . Середній інтервал оцінюється як $M = T_s / N$, тому під час опрацювання результатів тривалість обстеження T_s слід уточнювати так, що початком обстеження слід приймати момент проїзду через переріз 1-го ТЗ, а закінченням – момент проїзду останнього ТЗ у ньому. Стандартне відхилення оцінюється за формулою для генеральної сукупності

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (I_{sk} - M)^2}{N}}, \quad 1 \leq k \leq N_s, \quad (1)$$

де $I_{sk} = t_{k+1}^s - t_k^s$ – k -й зафіксований в обстеженні інтервал між ТЗ $k+1$ і k , с; t_k^s – фактичний момент проїзду k -го ТЗ в обстеженні, с.

У реальному ТП, в якому автомобілі їдуть один за одним на деякій дистанції, нульовий інтервал зустрітися не може, проте існує мінімальний інтервал T_{\min} , який може бути визначено або як мінімальне значення з усіх спостережень за умови щільного та середнього потоку, або, за умови дуже низької фактичної інтенсивності ТП, розрахунковим шляхом, на основі середніх габаритів ТЗ і дистанції безпеки. Другий випадок для даної задачі виглядає не зовсім цікавим, оскільки завдання координації для низької інтенсивності ТП багато в чому втрачає свою актуальність, так як її переваги, порівняно з адаптацією, більшою мірою проявляються в щільному трафіку, але якщо ж прибуття виявиться груповим, позитивний ефект від координації роботи світлофорів з жорстким циклом все ж таки можливий і виключати з розгляду цю ситуацію не варто.

Розгляд можливих варіантів прибуття ТЗ до перехрестя починається з регулярного потоку, в якому ТЗ рухаються з рівними інтервалами. У цьому не придатному для координації, ідеалізованому випадку потік характеризується нульовим стандартним відхиленням

$$\sigma_r = 0, \quad (2)$$

що дає можливість вважати його крайнім випадком серед усіх варіантів прибуття.

Наступним, за ступенем зростання стандартного відхилення, варіантом прибуття приймається найпростіший, Пуасонівський потік, який на відміну від регулярного потоку, широко поширений у реальному житті взагалі і в транспортних процесах зокрема.

Загальноприйнятим є використання найпростішого потоку під час визначення параметрів роботи

ізолюваних світлофорів, тому що він за умовами виникнення цілком підходить для цього випадку, що також не спростовувалося численними спостереженнями за подібними об'єктами. Цей потік також не підходить для координації, тому що всередині фіксованого на осі часу відрізка події в ньому розподілені рівномірно, тобто ймовірність їх потрапляння в якийсь невеликий проміжок часу не залежить від місця розташування останнього, а пропорційна довжині проміжку.

Така рівномірність не дає підстави для виокремлення в цьому потоці якихось проміжків часу з зниженою інтенсивністю, протягом яких заборона проїзду для потоку не збільшує середній час затримки ТЗ.

У найпростішому потоці інтервали між ТЗ розподілені показниково, а у випадку ТП – показниково, зі зсувом розподілу вправо на величину T_{\min} . У відповідності до відомих властивостей показникового розподілу, в якому математичне очікування і його стандартне відхилення σ_s дорівнюють один одному, тоді для реального ТП

$$\sigma_s = M - T_{\min}. \quad (3)$$

Оскільки в рівнянні стандартного відхилення (3) з'являється математичне очікування, то від окремого розгляду цих двох показників доцільно перейти до іншої характеристики випадкової величини – коефіцієнту варіації CV , що об'єднує їх відношенням $CV = \sigma/M$.

Тоді для регулярного ТП

$$CV_r = 0, \quad (4)$$

а для найпростішого ТП

$$CV_s = 1 - \frac{T_{\min}}{M} \neq 1. \quad (5)$$

Нерівність одиниці коефіцієнту варіації найпростішого ТП зумовлена тим, що є небажаною під час пошуку відмінностей між різними варіантами прибуття ТЗ до координованого РП. Його можна подолати за допомогою припущення про те, що мінімальний інтервал набагато менший за його середнє значення, $T_{\min} \ll M$.

Але це буде справедливо не для всіх умов і в разі зростання трафіку відношення T_{\min}/M може наближатися знизу до значення $\lambda = T_s/T_c$ – частки зеленого сигналу T_s в світлофорному циклі T_c РП у координації, до якого прибуває досліджуваний ТП. З погляду завдання, що розглядається, наближення коефіцієнту варіації найпростішого потоку до 0 є небажаним, оскільки звужує порівняльну базу для оцінювання параметрів ТП.

Необхідно відійти від цього явища, усунути його причину, що полягає у невідповідності між реальним ТП та ідеальним найпростішим потоком, у якому події є точками на осі часу, а не відрізками завдовжки T_{\min} .

Щоб уникнути цієї невідповідності, доцільно вирізати відрізки T_{\min} , що починаються з моментів

фіксації ТЗ в обстеженні, і перейти від початкової тривалості обстеження T_s до її перетвореного (ідеалізованого) аналога T_a :

$$T_a = T_s - T_{\min} \cdot N, \quad (6)$$

з відповідним перетворенням зафіксованих в обстеженні моментів проїзду ТЗ через обраний переріз та інтервалів між ними:

$$t_k = t_k^s - (k-1)T_{\min}, \quad 1 \leq k \leq N_s, \quad (7)$$

$$I_k = t_{k+1} - t_k, \quad (8)$$

де t_k – приведений до найпростішого потоку момент проїзду k -го ТЗ в обстеженні, с; $I_k = t_{k+1} - t_k$ – k -й приведений до найпростішого потоку інтервал між ТЗ $k+1$ і k , с.

Перетворення (6, 7, 8) приводить до шуканого результату – відповідності ТП, що прибуває на координоване перехрестя, його найпростішому аналогу і забезпечує рівність коефіцієнту варіації перетвореного ТП CV_a одиниці, $CV_a = 1$.

Воно зменшує математичне очікування інтервалу на T_{\min} в будь-якому варіанті прибуття, але нічого не змінює в коефіцієнті варіації регулярного потоку (2), який залишається рівним 0.

Таким чином два потоки прибуття, які точно не відповідають умовам включення їхнього джерела в координацію, надають два коефіцієнти варіації, що дорівнюють 0 і 1.

Попадання між ними або невелике перевищення одиниці отриманим у результаті обстеження перетвореним коефіцієнтом варіації означатиме недовільність включення до координації РП, від якого цей потік прибуває.

Для того, щоб з'ясувати, наскільки великою має бути відмінність від 1 коефіцієнту варіації реального ТП, після перетворення (6, 7, 8) необхідно розрахувати цей показник для варіантів прибуття, які для координації підходять.

Реальний варіант прибуття ТЗ на координоване перехрестя в будь-якому разі є випадковим, відповідно випадковим буде і коефіцієнт варіації потоку прибуття, що не дає можливості для визначення точних орієнтирів для характеристики групового прибуття, аналогічних уже описаним вище варіантам потоків.

Тому розв'язати задачу проведення межі району координації можна тільки за допомогою ідеалізації, відмовившись від випадковості прибуття і задаючи варіанти групового прибуття, які гарантовано забезпечують можливість для ефективної координації роботи світлофорів на двох сусідніх РП.

Ідеальним варіантом групового прибуття ТЗ до перехрестя є наявність у потоці однієї або кількох однорозмірних пачок з інтервалом між ТЗ у них, що дорівнює T_{\min} , і рівними інтервалами між пачками. У перетвореному потоці, інтервали в пачці дорівнюватимуть 0.

Для різної кількості пачок у такому потоці необхідно розрахувати коефіцієнти варіації, які слугуватимуть орієнтирами для розв'язання питання

щодо доцільності включення нового РП у координацію.

Нехай кількість пачок у зафіксованому під час обстеження ТП дорівнює i . Виходячи із загальної кількості інтервалів у ТП, що дорівнює N , кількість інтервалів між пачками дорівнює i , а кількість інтервалів усередині пачки дорівнює $N-i$. Тоді стандартне відхилення вихідного ТП, що складається з i пачок, дорівнюватиме:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N-i} (T_{\min} - M)^2 + \sum_{k=1}^i (T_{\max} - M)^2}{N}}, \quad (9)$$

де T_{\max} – інтервал між пачками ТЗ, с.

У перетвореному потоці T_{\min} стає рівним 0 і користуючись цим, а також тим, що доданки суми в цьому ідеалізованому потоці є константами, стандартне відхилення для нього матиме такий вигляд:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(N-i)M^2 + i(T_{\max} - M)^2}{N}}. \quad (10)$$

Метою перетворень є отримання значень коефіцієнтів варіації для різної кількості пачок у ТП, водночас уже наявні орієнтири щодо його значень для регулярного і найпростішого потоків не залежать від його ступеня

$$CV = CV^2,$$

що дає змогу перейти до використання квадрата коефіцієнта варіації як шуканого критерію для розв'язання питання про доцільність занесення нового РП у координацію

$$CV^2 = \left(\frac{\sigma}{M}\right)^2 = \frac{N^2 \sigma^2}{T^2}. \quad (11)$$

Це дасть змогу спростити шуканий критерій, позбувшись квадратного кореня в (10), при цьому не погіршуючи інформаційних можливостей і не втрачаючи смислового навантаження критерію:

$$CV^2 = \frac{N \left[(N-i)M^2 + i(T_{\max} - M)^2 \right]}{T_a^2}. \quad (12)$$

Рівняння (12) можна істотно спростити, для отримання зрозумілої форми критерію, розкривши для початку квадрат різниці в його чисельнику:

$$CV^2 = \frac{N \left[(N-i)M^2 + i(T_{\max}^2 - 2T_{\max}M + M^2) \right]}{T_a^2}. \quad (13)$$

Відкриття дужок у чисельнику надає широкі можливості для отримання такої простої форми критерію (12):

$$CV^2 = \frac{N \left[NM^2 - iM^2 + iT_{\max}^2 - 2iT_{\max}M + iM^2 \right]}{T_a^2}. \quad (14)$$

оскільки дає можливість для взаємного скорочення двох доданків:

$$CV^2 = \frac{N \left[NM^2 - 2iT_{\max}M + iT_{\max}^2 \right]}{T_a^2}. \quad (15)$$

Користуючись тим, що в перетвореному ТП інтервал між пачками дорівнює

$$T_{\max} = T_a / i,$$

можна підставити його значення в попереднє рівняння:

$$CV^2 = \frac{N \left[NM^2 - 2i \frac{T_a}{i} M + i \frac{T_a^2}{i^2} \right]}{T_a^2}. \quad (16)$$

Після очевидного приведення спільних множників у дробах виникає нова форма рівняння (16), у якій найактивнішу роль відіграє математичне очікування інтервалу M :

$$CV^2 = \frac{N \left[NM^2 - 2T_a M + \frac{T_a^2}{i} \right]}{T_a^2}. \quad (17)$$

Це дає можливість замінити його відповідним виразом для перетвореного ТП, $M = T_a / N$:

$$CV^2 = \frac{N \left[N \frac{T_a^2}{N^2} - 2T_a \frac{T_a}{N} + \frac{T_a^2}{i} \right]}{T_a^2}. \quad (18)$$

Після цього стають можливими кілька очевидних послідовних перетворень отриманої форми критерію (18):

$$CV^2 = \frac{N \left[\frac{T_a^2}{N} - 2 \frac{T_a^2}{N} + \frac{T_a^2}{i} \right]}{T_a^2}, \quad (19)$$

$$CV^2 = \frac{N \left[\frac{T_a^2}{i} - \frac{T_a^2}{N} \right]}{T_a^2}, \quad (20)$$

$$CV^2 = \frac{N}{i} - 1. \quad (21)$$

Отриманий критерій досягає максимуму за однієї щільної пачки в зафіксованому ТП:

$$CV_{\max}^2 = N - 1. \quad (22)$$

Зі зростанням кількості пачок він з уповільненням знижується, доходить до показника найпростішого потоку, $CV^2 = 1$, при

$$i = \frac{N}{2}, \quad (23)$$

і перетворюється на показник регулярного потоку, $CV^2 = 0$, при

$$i = N. \quad (24)$$

Така поведінка критерію показує взаємозв'язок між характеристиками різних варіантів потоків прибуття, зокрема цікавим є співвідношення між кількістю щільних пачок у найпростішому і рівномірному потоці (23) і (24). Воно показує, що в сенсі регулярності, найпростіший потік відрізняється

від рівномірного вдвічі, оскільки його аналогом з погляду дисперсії потоку є регулярний транспортний потік, який складається з пачок по два ТЗ у кожній. І цю відмінність правильно вважати незначною, з урахуванням максимального CV^2 (22), яке за реальних значень N перевищуватиме значення CV^2 регулярного і найпростішого потоку на кілька порядків.

Отриманий результат не суперечить загальновідомим статистичним закономірностям, за яких повністю випадкові процеси сходяться до регулярних подій, що добре ілюструється формулами для достатнього обсягу вибірки.

Графічне представлення залежності величини критерію (21) від величини N та i наведено на рис. 1.

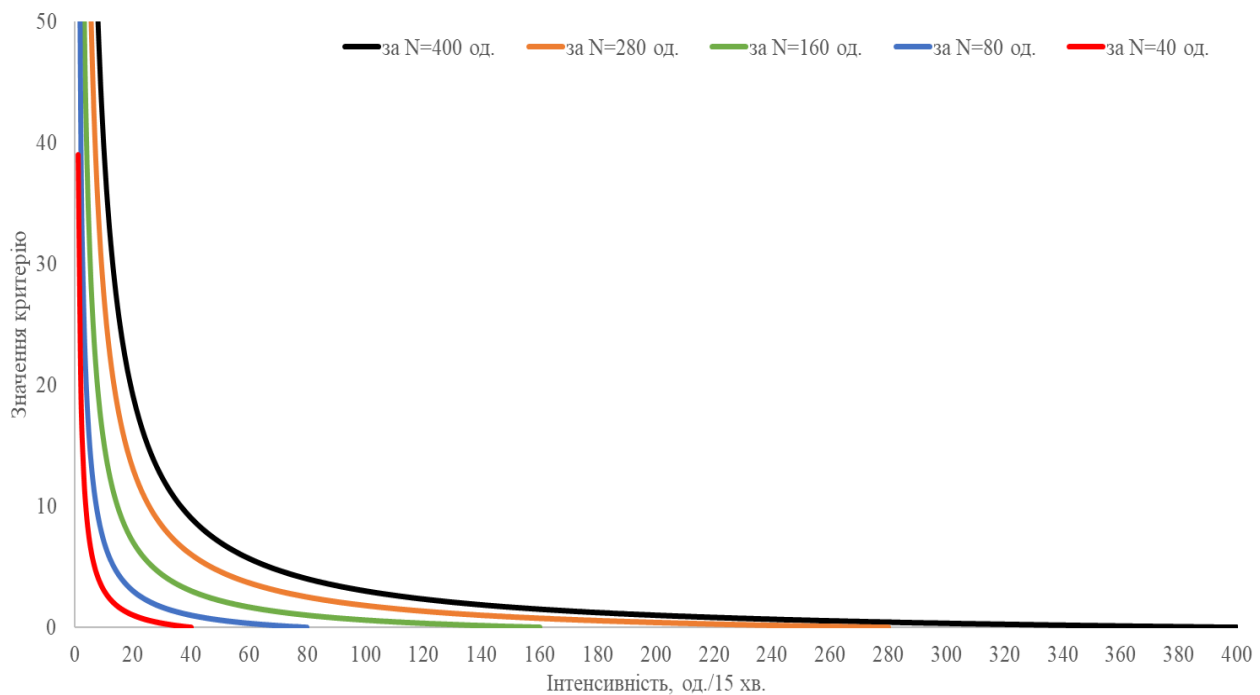


Рис. 1. Характеристичний графік (теоретичні криві) залежності величини критерію (21) від N та i

Отриманий критерій (21) повністю відповідає прийнятій методиці розрахунку тривалості СЦ, що ґрунтується на формуванні пачок ЗХ у кожному напрямі, оскільки за відомої з обстеження кількості ТЗ, N , її розмір на досліджуваному напрямі повністю визначається відношенням N/i .

Він дає змогу ухвалювати рішення щодо доцільності включення додаткового РП до просторової координації на підставі даних про інтенсивності ТП у досліджуваному районі.

Якщо розрахунковий CV^2 перетвореного ТП (21) на під'їзді до координованого РП, за раціонального значення величини пачки ЗХ, виявиться вищим за його фактичне значення, це означатиме, що координація роботи додаткового РП навряд чи можлива, внаслідок його близькості за властивостями до найпростішого потоку.

І навпаки, перевищення фактичним CV^2 розрахункового значення критерію свідчатиме про потенційну доцільність включення до координації додаткового РП, хоча й не може гарантувати ефективність цього рішення, внаслідок суттєвої залежності результатів координації від геометрії розглянутого фрагмента ВДМ, а також способу отримання критерію CV^2 (21) на основі ідеалізації реального транспортного потоку.

Величина CV^2 значною мірою випадкова, і не має однозначної відповідності з кожним варіантом транспортного потоку, тобто одні й ті самі його значення можуть відповідати різним за набором інтервалів прибуття потокам.

Тому використовувати його слід як необхідну, а не достатню умову доцільності розширення об'єкта

просторової координації за рахунок додаткового регульованого перехрестя, віддаючи перевагу остаточній оцінці ефективності різних варіантів плану координації в імітаційній моделі.

Висновки

Низьке значення критерію

$$CV^2 \leq 1$$

для перетвореного транспортного потоку дає однозначну негативну відповідь на питання щодо доцільності включення в координацію додаткового регульованого перехрестя, оскільки вказує на дуже високу рівномірність потоку прибуття до координованого регульованого перехрестя.

Виокремлення в такому потоці пачок зеленої хвилі на ще не включеному до координації регульованого перехрестя, з погляду економії середнього часу очікування на координованому регульованому перехресті, не має сенсу, оскільки його вплив на потік прибуття до координованого регульованого перехрестя виявляється в такому разі практично непомітним.

Ще одним результатом оцінки транспортного потоку на під'їзді до координованого регульованого

перехрестя має стати оцінка навантаження на ньому, що передбачається використанням методом координації роботи світлофорів. Тут також, як і в процесі перетворення транспортного потоку з метою отримання критерію (21), важливу роль відіграє значення мінімального інтервалу між транспортними засобами T_{\min} , що приймається в розрахунках, питання визначення якого в конкретних місцевих умовах до кінця не вирішене.

Ґрунтуючись на висловлених на початку цього матеріалу припущеннях, кращим видається комбінований спосіб його отримання, як мінімального значення з його розрахункової величини, на основі середніх габаритів транспортних засобів і дистанції безпеки та мінімуму з усіх зафіксованих в обстеженні інтервалів. Більше уточнення цього показника можливе надалі, під час накопичення експериментального досвіду з реалізації планів просторової координації.

Подальшими напрямками дослідження є проведення імітаційного експерименту щодо розробки плану просторової координації на вулично-дорожній мережі і експериментальна оцінка працездатності запропонованого критерію внесення нового регульованого перехрестя в план координації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ройко, Ю.Я., Грицунь, О.М. (2014). Підвищення ефективності функціонування ділянок вулично-дорожньої мережі в умовах координованого регулювання. Наукові нотатки, 45, 472-476.
2. Хітров, І.О. та ін. (2021). Аналіз транспортних затримок в центральній частині міста та шляхи їх зниження. Вісник машинобудування та транспорту, 2(14), 131-139. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-131-139>.
3. Кондрашова, В.Д. Магістральне управління транспортних потоків. Матеріали конференції [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/52334/1/%D1%871-161-163.pdf>.
4. Gluck, J., Levinson, H.S., Stover, V. (1999). Impacts of Access Management Techniques, NCHRP Report 420, Transportation Research Board, Washington, DC. 157 p.
5. Горбачов, П.Ф., Макарічев, О.В., Любий, С.В. (2024). Імітаційне моделювання часу випередження включення дозвільного сигналу світлофора в плані координації на міських магістралях. Вісник ВПІ, 3, 112-124. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-174-3-112-124>.
6. Wang, X.B., Yin, K., Liu, H. (2018). Vehicle actuated signal performance under general traffic at an isolated intersection. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 95, 582-598. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.08.002>.
7. Wierchowska, A. (2016). Design of Traffic-Actuated Plan Selection Road Signal Control : Thesis of Master Degree. Roma: Sapienza Universita di Roma. 123 p. https://web.uniroma1.it/cdaingtrasporti/sites/default/files/Thesis_AngelikaWierchowska.pdf.
8. Robertson, D.I. (1986). Research on the TRANSYT and SCOOT Methods of Signal Coordination. ITE Journal, 56(1), 36-40.
9. Gartner, N.H., Little, J.D.C., Gabbay, H. (1976). Simultaneous Optimization of Offsets, Splits, and Cycle Time. Transportation Research Record, 596, 5-15.
10. National Research Council. (2010). Highway Capacity Manual. Washington, DC: TRB. 1475 p.

Received (Надійшла) 12.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 12.11.2024

The criteria for including a signalized intersection in the coordination plan

Peter Horbachov, Yevhen Liubiy

Abstract. The article contains the results of the description and substantiation of the quantitative criterion for expanding the coordination plan on sections of the urban street road network. The use of the proposed criterion allows us to draw conclusions about the feasibility of including an additional regulated intersection in the spatial coordination based on data on the intensity of traffic flow on the sections of the road network under study. The developed criterion corresponds to the accepted methodology for calculating the duration of the traffic cycle, which is based on the formation of platoon progression in each direction of traffic on sections of the city's road network. The next stages of research in this area are the development of a simulation model of the coordination plan for a section of the road network and the experimental verification of the performance of the proposed criterion for including an additional signalized intersection in the coordination plan.

Keywords: progression, intensity, platoon, coordinated plan, signalized intersection.

К. Г. Ковцур, Н. В. Птиця, Д. А. Пономарьов

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ПОСТАЧАННЯ ШВИДКОСУВНИХ ВАНТАЖІВ В НАПРЯМКУ РЕСПУБЛІКА ПОЛЬЩА-УКРАЇНА В СУЧАСНИХ УМОВАХ

Анотація. Розглядається питання підвищити ефективність системи постачання швидкокусованих вантажів у напрямку Польща – Україна за рахунок зниження сумарних витрат на доставку. Як критерій для оцінювання ефективності процесу постачання вантажів запропоновано використовувати загальні витрати на виконання міжнародного перевезення, які складаються з витрат на заробітну плату водія за маршрутом, витрат на паливо, витрат на мастильні матеріали, витрат на технічне обслуговування автопоїзда, витрати на відновлення шин, амортизаційних відрахувань, витрат на страхування, витрат на стоянки, витрат на митні збори. Крім того враховано додаткові витрати, що пов'язані з очікуванням обслуговування через блокування польськими перевізниками пунктів пропуску, які включають наступні статті витрат – витрати, пов'язані з іммобілізацією грошових коштів, витрати на паливо через роботу рефрижераторної установки причепа автопоїзду та витрати на заробітну платню водію на відрадженьня.

Ключові слова: витрати, маршрут, пункт пропуску, схема доставки, час доставки, швидкокусований вантаж

Вступ

Постановка завдання. Специфіка постачання всіх видів швидкокусованих вантажів через кордон формує вимоги щодо пошуку рішень з ефективного використання ресурсів (транспортних засобів, складів тощо), з мінімізацією часу виконання технологічних операцій та зменшенням ризиків для повного виконання вимог замовників транспортних послуг. За рахунок збереження схоронності та безпеки швидкокусованих продуктів під час транспортування може значно зростати задоволеність клієнтів, тим самим підвищиться конкурентоспроможність транспортних підприємств.

У процесі доставки такий вид вантажів може втрачати свою цінність і свіжість. Взаємодія учасників ланцюга постачання повинна враховувати послідовність виконання усіх операцій та встановлювати відповідальність кожного з таких учасників за свою сферу роботи, уникати затримок та забезпечувати швидке реагування на зміни, що впливають на всю логістичну систему [1].

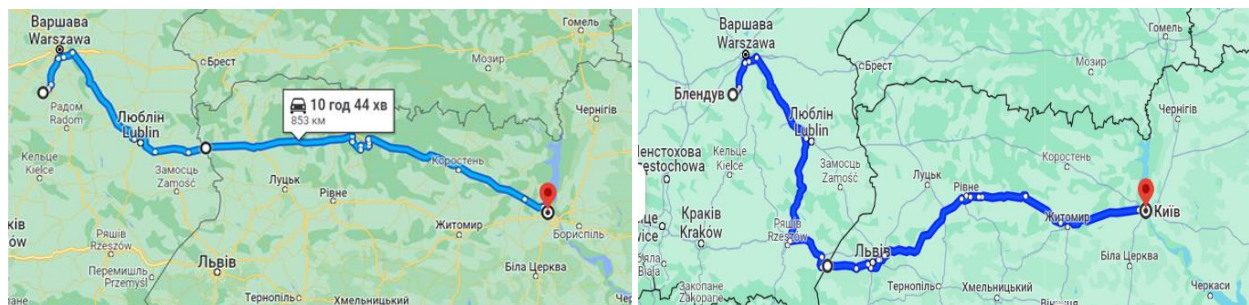
Міжнародна торгівля товарами та послугами має вагомe значення для будь-якої країни світу. За результатами 2023 року Польща посідає перше місце за

обсягами двосторонньої торгівлі товарами між Україною та країнами Європи [2].

Для апробації теоретичних розробок розглядається українське підприємство, діяльність якого спрямована на забезпечення внутрішнього ринку України плодово-овочевою продукцією згідно сезонності вирощування, а також, продукцією нетипової для вирощування в кліматичних умовах України (екзотичні фрукти і овочі, цитрусові).

Маршрут, що досліджено, пролягає з Республіки Польща до України. Розглядається доставка яблук різних сортів. Для перевезення даного типу вантажу необхідно використовувати автомобілі з рефрижераторною установкою [3]. На постійній основі з періодичністю близько 1 – 2 рази на тиждень здійснюється дане перевезення. Пункт навантаження (замитнення) – Польща (Блендув), пункт розмитнення/розвантаження – Україна (Київ), пункт переходу кордону – Україна (Ягодин). Протяжність такого маршруту складає приблизно 853 км (рис. 1, а).

Пунктами перетину двох держав є Дорогуськ – Ягодин, Зосін – Устилуг, Долгобичув – Угринів, Гребенне – Рава-Руська, Будомеж – Грушів, Корчова – Краковець, Медика – Шегині, Кросценко – Смільниця.



а – через МАПП «Ягодин-Дорогуськ»

б – через МАПП «Медика – Шегині»

Рис. 1. Існуюча та альтернативна схема маршруту руху Блендув (Польща) – Київ (Україна)

На разі в листопаді 2023 року через блокування руху вантажівок польськими перевізниками на трьох пунктах пропуску на польсько-українському кордоні

рух вантажного транспорту сповільнився (в середньому 1 автомобіль на годину), в тому числі, і в напрямку в'їзду в Україну. Наразі спостерігався спо-

вільнений рух через ПП «Гребенне – Рава-Руська», ПП «Корчова – Краківець» та ПП «Дорогуськ – Ягодин» (рисунок 2).

До груп (1–24) Українського класифікатора товарів зовнішньо-економічної діяльності відносяться товари (продукція), що вирощуються, відгодовуються, виловлюються, збираються, виготовляються, виробляються, переробляються безпосередньо виробником цих товарів (продукції), а також продукти обробки та переробки цих товарів (продукції), якщо вони були придбані або вироблені на власних або орендованих потужностях (площах) для продажу, переробки або внутрішньогосподарського споживання.

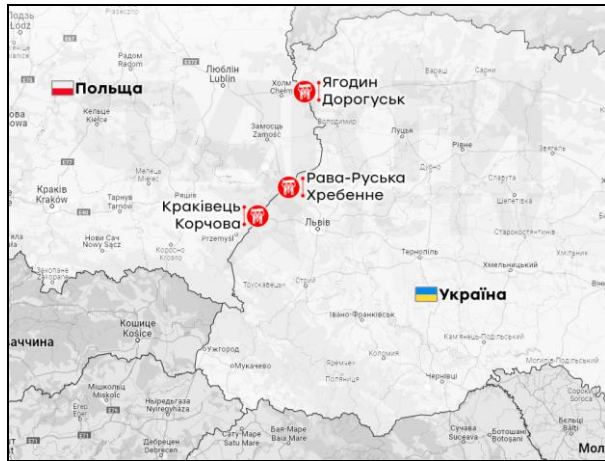


Рис. 2. Перекритий рух вагового транспорту на МАПП Польщі з Україною

А отже час в черзі згідно з мобільним додатком «С-черга» [4] становитиме понад 17 днів, що зовсім стає неприпустимим при доставці яблук до України, що і обумовлює актуальність даної теми дослідження. Максимальний термін зберігання яблук становить 4-6 місяців в залежності від температури зберігання, вологості тощо (рисунок 3).

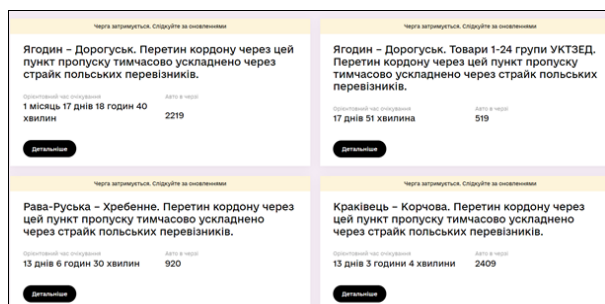


Рис. 3. Інформація про черги в пунктах пропуску Польща-Україна

З врахуванням поточної ситуації на МАПП «Дорогуськ» – МАПП «Ягодин» термін доставки значно зростає і становитиме майже місяць, що складає чверть життєвого циклу даного виду швидкопсувального вантажу.

Постановка завдання. У зв'язку з ситуацією, що склалася на кордоні Польщі та України доцільно розглянути маршрут у міжнародному автомобільному сполучення Блендув (Польща) – Київ (Україна) із

проходженням альтернативного міжнародного автомобільного пункту пропуску «Медика – Шегіні», схема якого наведена на рисунку 1(б), загальна відстань якого складає 1100 км. Постає задача оцінити доцільність зміни маршруту через ситуацію, що склалася на кордоні України та Польщі. Критерієм вибору є витрати на постачання для кожної схеми з врахуванням додаткових витрат, які мають враховувати витрати в неявному вигляді, а саме втрати під час очікування в черзі в заблокованих пунктах пропуску.

Виклад основного матеріалу

У Європейському Союзі регулювання трудової діяльності водіїв вантажівок здійснюється відповідно до Директиви Європарламенту №561 від 2006 року [5]. Зазначена директива визначає обов'язок встановлення тахографа на транспортний засіб та встановлює штрафи за порушення трудових норм водієм. Загальна відстань запропонованого маршруту довша, ніж маршруту через МАПП «Дорогуськ – Ягодин», проте, за рахунок руху по міжнародній дорозі E40 автомобіль має можливість рухатись значно швидше. Не зважаючи на зміну маршруту через блокування МАПП, при постачанні швидкопсувних вантажів через МАПП «Медика – Шегіні» час доставки зміниться несуттєво і в обох випадках виконання маршруту займе 5 діб. В складових терміну доставки не враховано можливий час очікування в черзі, яка спостерігається в заблокованих ПП, але цей час важко спрогнозувати і залежить він виключно від кількості транспортних засобів в черзі та пропускної спроможності самого пункту. Головним критерієм оцінки запропонованих рішень залишається витрати на функціонування схеми постачання. На ці витрати мають вплив: собівартість виконання i -х операцій, обсяг партії вантажів, відстань перевезення та часові параметри виконання i -х технологічних операцій.

Критерієм ефективності приймаються витрати на доставку на маршрутом

$$Z_{\text{сум}} \rightarrow \min \quad (1)$$

Загальні витрати на виконання міжнародного перевезення [6] можна визначити за наступною залежністю

$$Z_{\text{сум}} = Z_{\text{зн}} + Z_{\text{п}} + Z_{\text{м}} + Z_{\text{то}} + Z_{\text{ш}} + A + Z_{\text{страх}} + Z_{\text{стоян}} + Z_{\text{мит}}, \quad (2)$$

де $Z_{\text{зн}}$ – витрати на заробітну платню водію за маршрутом, грн.;

$Z_{\text{п}}$ – витрати на паливо, грн.;

$Z_{\text{м}}$ – витрати на мастильні матеріали, грн.;

$Z_{\text{то}}$ – витрати на технічне обслуговування автомобіля, грн.;

$Z_{\text{ш}}$ – витрати на відновлення шин, грн.;

A – амортизаційні відрахування, грн.;

$Z_{\text{страх}}$ – витрати на страхування, грн.;

$Z_{\text{стоян}}$ – витрати на стоянки, грн.;

$Z_{\text{мит}}$ – витрати на митні збори, грн.

Граничні норми відшкодування витрат на відрядження в межах України та в межах іноземних держав визначаються статтею 170 «Особливості нарахування (виплати) та оподаткування окремих видів доходів» Податкового кодексу України [7] та встановлюються залежно від розміру мінімальної заробітної плати на початок звітного, податкового року. По закордонним відрядженням Податковий кодекс України встановлює неоподатковувані добові витрати на рівні 80 євро за кожний день відрядження.

Для обліку використовується курс НБУ, який діє на кожний з днів відрядження. Норма неоподатковуваних добових витрат для відряджень Украї-

ною у 2023 році – 670 грн. (0,1 від мінімальної зарплати на 01.01.2023), з 01.04.2024 року – норма неоподатковуваних добових витрат для відряджень Україною становить 800 грн.

Для визначення витрат на паливо слід враховувати крім обсягу витрат палива на виконання роботи на підставі загального пробігу на кожній ділянці, ще й додаткові витрати палива, що враховують норму витрати палива транспортного засобу у завантаженому стані та витрати палива на роботу рефрижераторної установки.

Слід зазначити, що сумарні витрати на доставку при використанні першої схеми менші, ніж при запропонованій.

Таблиця 1 – Порівняння статей витрат за існуючою і запропонованою схемою доставки

Показник	Схема доставки	
	Існуюча	Запропонована
Витрати на заробітну плату водія за маршрутом, грн.	8742,02	8646,74
Витрати на паливо, грн.	25927,79	28658,59
Витрати на мастильні матеріали, грн.	3111,33	3439,03
Витрати на технічне обслуговування автопоїзда, грн.	1176	1380
Витрати на відновлення шин, грн.	1960	2300
Амортизаційні відрахування, грн.	1332,8	1564
Витрати на страхування, грн.	1274,8	1274,8
Витрати на стоянки, грн.;	918,75	866,25
Витрати на митні збори, грн.	800	800
Сумарні витрати, грн.	45243,49	48929,41

При наявності черги на МАПП «Дорогуськ – Ягодин» через блокування польськими перевізниками зміняться витрати, пов'язані з іммобілізацією грошових коштів через те, що вартість вантажу на час доставки вилучається з оборту. Крім того, під час потрапляння в чергу рефрижераторна установка причепу автопоїзду має працювати увесь час, що збільшує витрати на паливо. Також з'являються додаткові витрати на заробітну платню водію на відрядження. Отже додаткові витрати, викликані наявною чергою, становитимуть

$$Z_{\text{доп}} = Z_{\text{ім}} + Z_{\text{зн}} + Z_{\text{реф}}, \quad (3)$$

де $Z_{\text{ім}}$ – витрати на іммобілізацію грошових коштів, грн.;

$Z_{\text{зн}}$ – витрати на заробітну платню водію (добові), грн.;

$Z_{\text{реф}}$ – витрати на паливо, пов'язані з роботою рефрижератора.

Витрати пов'язані з тим, що вартість вантажу на час доставки вилучається з оборту розраховується

$$Z_{\text{ім}} = \frac{C_{\text{в}} \cdot T_{\text{д}} \cdot D}{365 \cdot 100}, \quad (4)$$

де $C_{\text{в}}$ – ціна вантажу, грн.;

$T_{\text{д}}$ – термін доставки, дбб;

D – річна ставка дисконту, %.

Крім того, під час потрапляння автопоїзду в чергу рефрижераторна установка причепу має працювати увесь час, що збільшує витрати на паливо. Витрати дизельного палива на роботу рефрижераторної установки складуть

$$Q_{\text{реф}} = H_{\text{реф}} \cdot T_p, \quad (5)$$

де $H_{\text{реф}}$ – норма витрати палива на роботу рефрижераторної установки, л/ авт.-год;

T_p – час роботи транспортного засобу, год.

Також з'являються додаткові витрати на заробітну платню водію.

Нарахування заробітної плати водієві, який виконує міжнародний рейс, визначається

$$Z_{\text{зн}} = S_{\text{зн}} + N_p \cdot B_{\text{відр}}, \quad (6)$$

де $S_{\text{зн}}$ – ставка заробітної плати водія (зазвичай це мінімальна ставка місячної заробітної плати в Україні), грн.;

N_p – кількість рейсів за місяць, од.;

$B_{\text{відр}}$ – витрати на відрядження, грн.

Моделювання довжини черги з кроком в 4 доби (0, 4, 8, 12, 16, 20 днів) дає змогу визначити раціональну схему постачання (рис. 4).

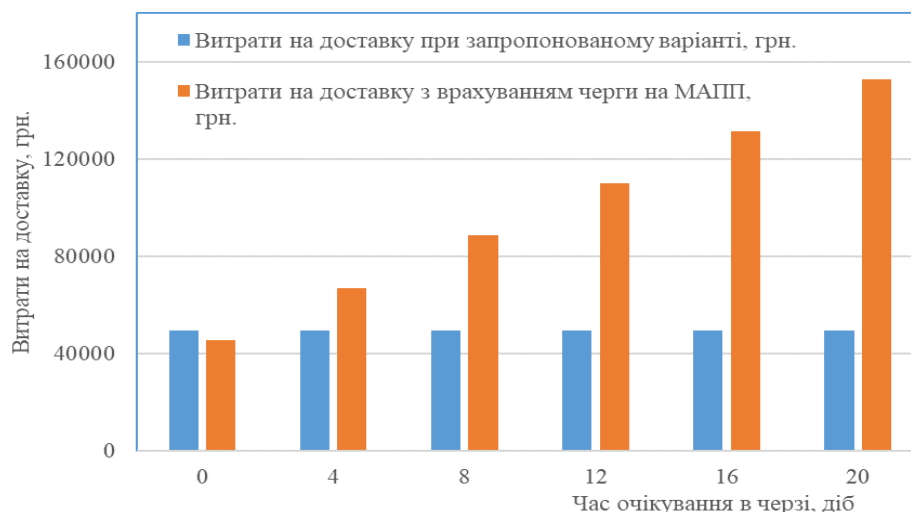


Рис. 4. Витрати на доставку для різних схем доставки

Використання запропонованої варіанту постачання при наявності черги на МАПП «Дорогуськ – Ягодин» тривалістю в 4 доби, дозволяє отримати економічний ефект в розмірі 17748,92 грн. за рейс. При збільшенні часу очікування на пункті пропуску до 8 діб, витрати на доставку для існуючої схеми в два рази перевищують витрати при використанні запропонованої схеми, що доводить ефективність запропонованих рішень в умов, що склались, для перевезення швидкопсувних вантажів.

Отже при існуючій схемі доставки через МАПП «Дорогуськ – Ягодин» витрати становлять 45243,49 грн., що на 3685,92 грн. менше, ніж при використанні запропонованої схеми. Однак при наявності черги на МАПП «Дорогуськ – Ягодин» необхідно враху-

вати додаткові витрати, які утворюються через тривалість очікування в черзі.

Висновки

Використання запропонованої методики визначення загальних витрат, що враховує додаткові витрати, пов'язані з очікуванням обслуговування через блокування польськими перевізниками пунктів пропуску, які включають витрати, пов'язані з іммобілізацією грошових коштів, витрати на паливо через роботу рефрижераторної установки причепу автопоїзду та витрати на заробітну платню водію на відрядження, дозволять виявити витрати не тільки в явному вигляді, а й додаткові втрати, що впливає на вибір схеми постачання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Федорова Т.Ф., Ширяєва А.М., Петренко К.А. Особливості функціонування логістичного ланцюга з доставки швидкопсувних вантажів автотранспортом. Вісник СХУ ім. В. Даля. 2011. № 5(159). Частина 1, С. 203–207.
2. Як змінювалися обсяги торгівлі України та Польщі : Аналітичний портал Слово і Діло. URL: <https://www.slovoidilo.ua/2023/04/14/infografika/ekonomika/yak-zminyuvalysya-obsyahu-torhivli-ukrayiny-ta-polshhi> (дата звернення 11.09.2023).
3. Правила перевезення швидкопсувних вантажів: зі змінами : Міністерство інфраструктури України / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1031-02> (дата звернення 11.12.2023).
4. Електронна черга перетину кордону : офіційний сайт «Черга». URL: <https://echerha.gov.ua/> (дата звернення 10.11.2023).
5. Регламент Європейського Парламенту і Ради (ЄС) № 561/2006 від 15 березня 2006 року : Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_761#Text (дата звернення 11.11.2023).
6. Павленко О.В., Музицький Д.О. Стабільна модель функціонування логістики для постачання швидкопсувних продуктів маршрутами Україна–Польща. Комуніальне господарство міст. 2023. 1 (175). С. 237–242.
7. Відрядження за кордон 2023: Платформа Бухгалтерія. URL: <https://buhplatforma.com.ua/article/7352-vdryadjennya-za-kordon> (дата звернення 11.09.2023).

Received (Надійшла) 12.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 12.11.2024

Improving the efficiency of the perishable goods supply system in the direction of the republic of Poland - Ukraine in the current conditions

Kateryna Kovtsur, Natalia Pitytsia, Daniil Ponomarev

Abstract. The issue of increasing the efficiency of the supply system of perishable goods in the direction of Poland - Ukraine by reducing the total costs of delivery is considered. As a criterion for assessing the efficiency of the cargo delivery process it is proposed to use the total costs of international transportation, which consist of the cost of driver's salary on the route, fuel costs, lubricants, road train maintenance costs, tyre recovery costs, depreciation charges, insurance costs, parking costs, customs duties. In addition, additional costs related to waiting for service due to blocking of border crossing points by Polish carriers have been taken into account, which include the following cost items – costs related to immobilisation of funds, fuel costs due to operation of the refrigerator unit of the road train trailer and driver's salary costs for travelling.

Keywords: costs, route, checkpoint, delivery scheme, delivery time, perishable goods.

Д. В. Кислиця¹, Ю. О. Басова², С. Г. Кислиця¹, Г. М. Кожушко¹, Р. В. Захарченко¹

¹ Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

² Полтавський державний аграрний університет, Полтава, Україна

СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ – ЕФЕКТИВНИЙ ШЛЯХ ЕКОНОМІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОСВІТЛЕННЯ

Анотація. В роботі розглядаються типові функції систем керування освітленням та перспективи їх розвитку з використанням сучасних досягнень в світлодіодній техніці, мініатюризації компонентів, які можуть інтегровані в системі світлодіодних модулів таких як датчики, використанні бездротового зв'язку, можливість керування інформацією через Internet. Основні типові функції систем автоматичного керування освітленням: підтримання штучного освітлення в приміщеннях на зоровому рівні; зниження споживаної потужності систем освітлення за рахунок використання природного освітлення; зниження споживаної потужності систем освітлення за рахунок їх оптимізації в кожен момент часу, зокрема, вихідні та святкові дні, залежно від присутності людей в приміщенні та ін.; комбіноване керування освітленням з використанням ручного та автоматизованого, що дозволяє визначати параметри освітлення з врахуванням індивідуальних побажань споживачів; вибір параметрів освітлення на основі даних попередніх налаштувань, які можуть покращити світлове середовище; забезпечення параметрів освітлення орієнтованого на концепцію інтегративного освітлення («освітлення для людей», HCL) шляхом автоматичного регулювання рівня освітленості та колірності світла впродовж дня та ін. Системи керування освітленням в своїй основі базуються на використанні датчиків часу, присутності та рівнів освітленості, або комбінованих датчиків, що поєднують в собі ці функції. В світовій практиці для автоматичного керування освітленням застосовуються два основних інтерфейси керування вихідним струмом: аналоговий і цифровий. В статті наводиться інформація стосовно особливостей регулювання параметрів світлодіодів з використанням аналогових і цифрових інтерфейсів, розглядаються деякі питання створення систем інтелектуального освітлення та перспектив використання систем освітлення штучного інтелекту. Зроблені висновки стосовно енергоефективності використання систем автоматичного керування освітленням, основних вимог до їх параметрів та перспективи розвитку.

Ключові слова: світлодіодні лампи, системи керування освітленням, мерехтіння, димінг, широтно-імпульсна модуляція.

Вступ

Постановка проблеми. Згідно з даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA) 19 % світового виробництва електроенергії (ЕЕ) витрачається на освітлення, тому надзвичайно актуальною є проблема скорочення споживання ЕЕ системами освітлення (СО). В Європейському законодавстві в сфері енергоефективності останнім часом прийнято ряд нових нормативних документів, направлених на підвищення енергоефективності освітлення [1-2] на основі яких в Україні впроваджуються відповідні технічні регламенти. Не менш важливою є проблема якості світла. Одним із головних завдань якісного освітлення є забезпечення комфортної зорової роботи та адекватного сприймання навколишнього середовища. Недавні медико-біологічні дослідження показали, що світло крім зорових функцій спричиняє на організм людини нездоровий біологічний та психологічний вплив. Короткохвильове світло викликає пригнічення секреції мелатоніну, підвищує почуття бадьорості, частоту серцевих скорочень, температуру тіла та ін. Хороше освітлення позитивно впливає на здоров'я, бадьорість, продуктивність праці і навіть на якість сну [3-6]. Системи освітлення спроектовані за принципами, що враховують біологічні та емоційні ефекти впливу світла на людину, мають забезпечувати рівні освітленості та спектральний склад випромінювання наближені до природних [7].

Сьогодні лампи та світильники з використанням світлодіодів стали основною технологією освітлення практично у всіх сферах. Вони мають цілий ряд переваг в порівнянні з лампами розжарювання та розрядними лампами. Крім високої енергоефективності необхідно назвати високу надійність та тривалий строк служби, екологічність, стійкість до механічних впливів, електоро-, пожежо- та вибухобезпечність. Завдяки компактності розмірів світлодіодів створюються нові можливості застосування ефективної оптики, різних дизайнерських рішень, а також додаткові зручності при експлуатації освітлювальних установок за рахунок систем керування освітленням, застосуванням цифрових контролерів та ін. [6, 7].

Одним із ефективних напрямків зниження споживання ЕЕ на освітлення будівель є використання сучасних систем керування освітленням. Системи керування освітленням в своїй основі базуються на використанні датчиків часу рівня освітленості та присутності людей, або комбінованих датчиків, які поєднують ці функції [7-10]. Керування освітленням може використовуватись в установках як з регулюванням рівня освітлення так і без нього.

Економія ЕЕ суттєво залежить від прийнятого способу керування: економія ЕЕ зростає приблизно від 25% при використанні датчиків освітленості для нерегульованого освітлення до 75% при використанні комбінованих датчиків у випадку регульованого освітлення. Найбільш ефективним є режим,

коли освітлення вимикається (при відсутності в ньому потреби). Використання програмного забезпечення для керування освітленням дозволяє індивідуальним користувачам регулювати рівень освітленості на робочому місці. Економія електроенергії може при цьому досягатись через мінімізацію рівня загального освітлення і використання переважно місцевого освітлення робочих місць.

Питанням економії ЕЕ і підвищенню комфортності при використанні систем керування освітленням присвячена велика кількість наукових праць. Найбільш ефективним напрямком є використання в сучасних освітлювальних системах цифрових технологій [7, 11-14]. Разом зі світлодіодними технологіями освітлення цифровізація і Інтернет створюють фактично нову реальність світлотехніки. Результати нових досліджень ролі світла для фізіологічного і психологічного здоров'я людей відкрили особливості не візуальних ефектів впливу, показали важливість динамічних змін світлового середовища і його гармонізації з природним світловим середовищем [15-17]. В новій редакції світлотехнічного словника Міжнародної комісії з освітлення (МКО) вже з'явився термін «Інтегративне освітлення» (Integrative Lighting) – освітлення, що призначене для корисного фізіологічного і психологічного впливу на людину.

Метою даної роботи є проведення аналізу і визначення перспективних напрямків вдосконалення систем керування світлодіодним освітленням для підвищення його енергоефективності та ергономічності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Витрати ЕЕ на освітлення можуть бути знижені шляхом оптимальної роботи СО в кожен момент часу. Найбільш ефективно це можливо здійснювати за допомогою автоматизованих систем управління освітленням. Автоматизовані СО виконують наступні типові функції:

– *Підтримання штучної освітленості в приміщенні на заданому рівні.* Досягається це введенням в СО фотодатчика, що контролює утворювану освітленість. Ця функція дозволяє економити ЕЕ за рахунок обмеження «надлишкової освітленості».

– *Врахування природної освітленості в приміщенні.* Як правило, потужність СО розраховується без врахування частки природного світла, що потрапляє в приміщення в світлу частину доби. Якщо підтримувати освітленість, що створюється спільно штучною СО та природним світлом на заданому рівні, то можна знижувати потужність СО в кожен момент часу (в певний період року, часу доби). Ця функція може здійснюватися датчиком рівня освітленості, який відслідковує повну (природну і штучну) освітленість. При цьому можна економити 20-40% ЕЕ на освітлення приміщень.

– *Врахування часу доби і днів тижня.* Додаткова економія ЕЕ може бути досягнена вимиканням СО в певний час доби та вихідні і святкові дні. Для реалізації цієї функції СО має бути обладнана власним графіком реального часу вмикання/вимикання ОУ.

– *Врахування присутності людей в приміщенні.* При застосуванні в СО датчика присутності мо-

жна вмикати і вимикати СО залежно від того, чи люди в приміщенні. За рахунок такої автоматизації можна економити ЕЕ до 10-25%.

Зростання ролі світлодіодів в технологіях освітлення спричинило новий поштовх і в розвитку систем світлорегулювання. Важливою перевагою світлодіодних світильників перед світильниками з розрядними лампами є можливість більш ефективно здійснювати керування світловим потоком. В світлодіодному світильнику можна реалізувати плавну зміну світлового потоку (димінг) в ручному і автоматичному режимі залежно від певних умов. Такими умовами можуть бути, наприклад, зовнішня освітленість, присутність людей в освітлювальній зоні та ін. Плавне регулювання світлового потоку дозволяє більш ефективно використовувати зовнішню освітленість і знизити витрати на споживану ЕЕ.

Всі призначені для економії ЕЕ системи керування освітленням в своїй основі базуються на використанні датчиків часу, присутності, рівня освітленості або комбінованих датчиків, що об'єднують в собі ці функції [8-11].

Сучасні інтелектуальні датчики є головними засобами керування СО. Ці датчики можуть бути адаптовані стосовно вимог до присутності людей, зміни природного освітлення та ін. Сьогодні серійно виробляються і багатоцільові датчики, що містять в собі фотоелектричні датчики для реєстрації змін в рівні освітленості, пасивні інфрачервоні та ультразвукові датчики для виявлення рухомих об'єктів та інші функції. Такі датчики можуть використовуватись для створення логічних керуючих пристроїв, які налаштовуються на зміну рівня освітленості при виявленні рухомих об'єктів в зоні, що контролюється, якщо рівень освітленості в цій зоні менший заданої величини. Залежно від часу доби датчик освітленості може програмуватись на зменшення рівня освітленості при відсутності людей. Після закінчення робочого дня цей же датчик може забезпечувати поступове зменшення освітленості до повного вимикання протягом певного часу, наприклад 10 хвилин, або вмиканням сигналу про закінчення робочого дня.

Для підвищення комфортності освітлення плавне регулювання датчика залежно від рівня природної освітленості є важливим параметром. Датчики, що приєднані до окремого світильника або групи світильників протягом дня здійснюють плавне регулювання рівня освітленості за заданою програмою.

Інтелектуальні датчики забезпечують комфорт освітлення і в вечірній час, плавно змінюючи рівень освітленості шляхів виходу з будівель та зон, що прилягають до них і зменшують нераціональне використання ЕЕ на освітлення при відсутності людей.

Новим перспективним напрямком економії ЕЕ є індивідуальне керування освітленням. Використання спеціального програмного забезпечення дозволяє індивідуальним користувачам за допомогою робочих станцій і офісних комп'ютерів керувати освітленням. Економія ЕЕ при цьому досягається шляхом мінімізації рівня загального освітлення і максимально ефективного використання місцевого освітлення. Керувати величиною світлового потоку

світлодіодних ламп та світильників можна кількома способами.

В світовій практиці для автоматичного керування освітленням застосовується два основних інтерфейси керування вихідним струмом (димінгу): аналоговий і цифровий.

Аналоговий інтерфейс – це інтерфейс керування, який дозволяє змінювати значення вихідного струму за допомогою керуючої напруги [18]. Цифровий інтерфейс – це інтерфейс керування, який дозволяє змінювати вихідний струм за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) [19]. Загальна

схема світлодіодного світильника з функцією керування яскравістю представлена на рис. 1. Ця схема складається із чотирьох основних блоків: джерела живлення зі стабілізованим вихідним струмом і вбудованим інтерфейсом керування, світлодіодного модуля і датчика Д. Для створення автономного світильника потрібен датчик на основі сигналів якого світильник буде вмикатись/вимикатись (датчик руху) або змінювати яскравість (датчик рівня освітленості). В якості пристроїв керування можна застосовувати готові контролери або розробляти власні пристрої.

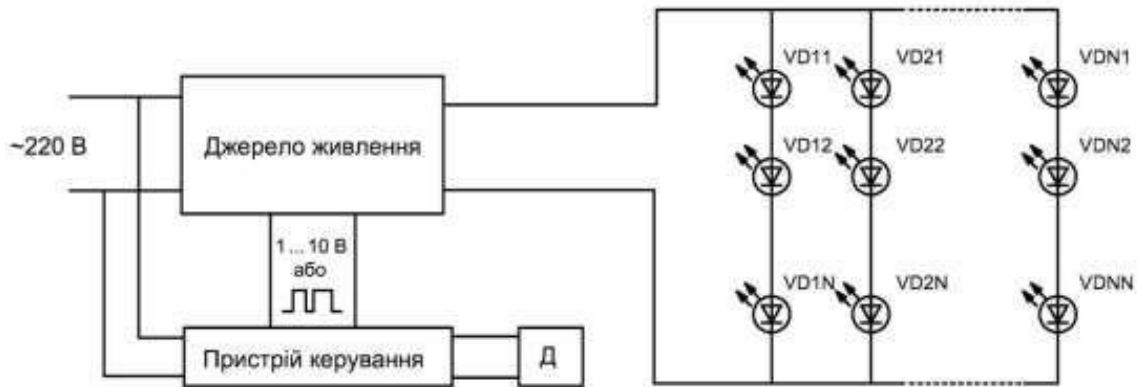


Рис. 1. Схема світлодіодного світильника з функцією димінгу

Аналогове регулювання світлового потоку здійснюється шляхом зміни постійного струму, що проходить через світлодіодний ланцюжок. При цьому регулюється опорна напруга всередині джерела світла або напруга на струмочутливому резисторі зовні цього джерела.

Регулювання яскравості шляхом зміни опорної напруги. Для більшості світлодіодних драйверів струм світлодіоду визначається таким рівнянням:

$$I_{LED} = V_{REF} / R_{SNS}, \quad (1)$$

де V_{REF} – внутрішня опорна напруга світлодіодного драйвера; R_{SNS} – величина опору струмочутливого резистору.

Струм через світлодіод регулюється шляхом зміни V_{REF} . Але необхідно зазначити, що не всі драйвери допускають таке регулювання. Існує два способи налаштування драйверів з опорною напругою.

Перший з них полягає в подачі аналогової напруги на відповідний вивід опорної напруги, що є в мікросхемі.

Другий спосіб полягає в регулюванні опорної напруги за допомогою цифрового інтерфейсу типу.

Ще одним розповсюдженим методом аналогового керування струмом світлодіоду, зміна напруги на струмочутливому резисторі, величина якого в більшості випадків менше 1 Ом.

На практиці напруга на цьому резисторі змінюється на виводі CS (рис.2) мікросхеми подачі зовнішньої змінної напруги.

На рис. 2 показаний типовий аналоговий ланцюжок керування струмом світлодіоду, в якій напруга змінюється на струмочутливому резисторі.

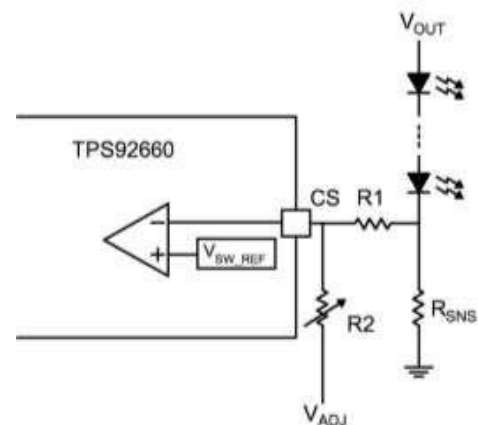


Рис. 2. Типова аналогова схема регулювання струму

Напруга на виводі CS визначається як:

$$V_{CS} = R_1(R_1 + R_2)V_{ADJ} - R_2(R_1 + R_2)I_{LED}R_{SNS}. \quad (2)$$

В стійкому стані напруга на виводі CS дорівнює опорній напрузі. Струм світлодіоду змінюється шляхом регулювання зовнішньої напруги V_{ADJ} або резистора змінного опору R_2 .

Аналоговий інтерфейс керування дозволяє регулювати вихідний струм за допомогою зовнішньої керуючої напруги, яка надається на вивід джерела живлення. Керуюча напруга змінюється від 1 до 10 В, що призводить до змін вихідного струму джерела живлення.

Приклад характеристики керування наведено на рис. 3.

По осі ординат відкладені значення вихідного струму (у відсотках), а по осі абсцис – керуюча напруга (у вольтах).

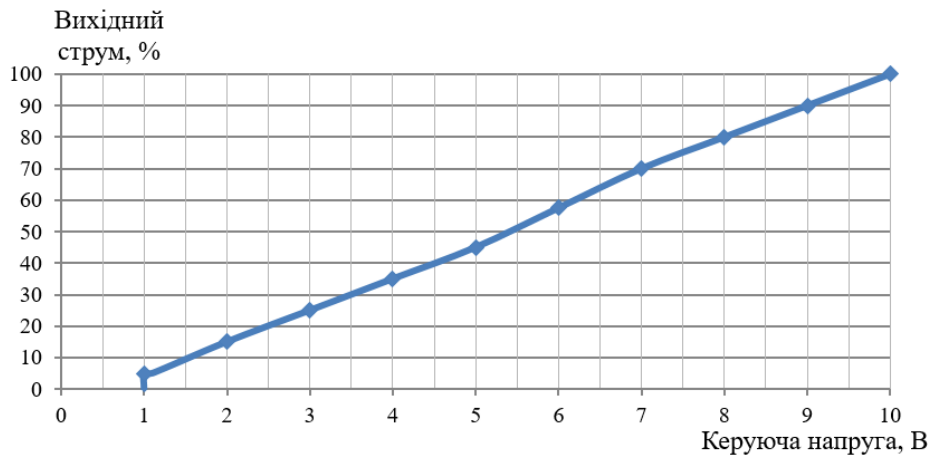


Рис. 3. Характеристика керування джерела живлення з димером (з аналоговим інтерфейсом керування)

Цей графік не є загальним для всіх джерел живлення з аналоговим інтерфейсом керування. Для кожного модуля регульовальна характеристика наводиться в паспорті.

Суть керування яскравістю за допомогою ШІМ полягає в вмиканні і вимиканні світлодіодів з заданим коефіцієнтом заповнення і частотою. Так як перемикання світлодіодів проходять досить швидко (з частотою більшою 200 Гц) то світло сприймається як безперервне.

Струм, що протікає через світлодіод при цьому методі визначається рівнянням:

$$I_{DM} = D \cdot I_{LED}, \quad (3)$$

де I_{DM} – регульований струм через світлодіод; D – коефіцієнт заповнення; I_{LED} – постійний струм через комутуючий ланцюг.

Схема ШІМ-сигналу та приклад регулюючої характеристики джерела живлення наведені на рис. 4 та 5.

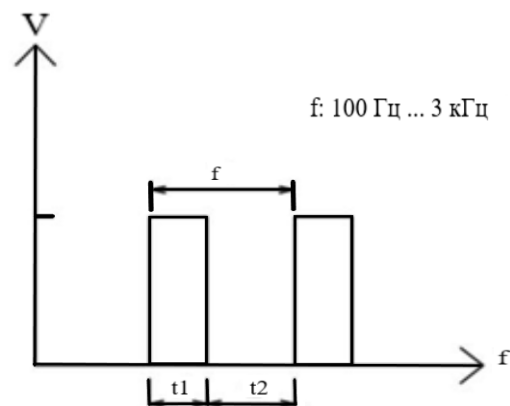


Рис. 5. Схема ШІМ-сигналу керування струмом світлодіодів

Найбільш перспективними системами регулювання освітлення є системи, в яких регулюються не тільки рівень освітленості, а і зміна кольору світла.

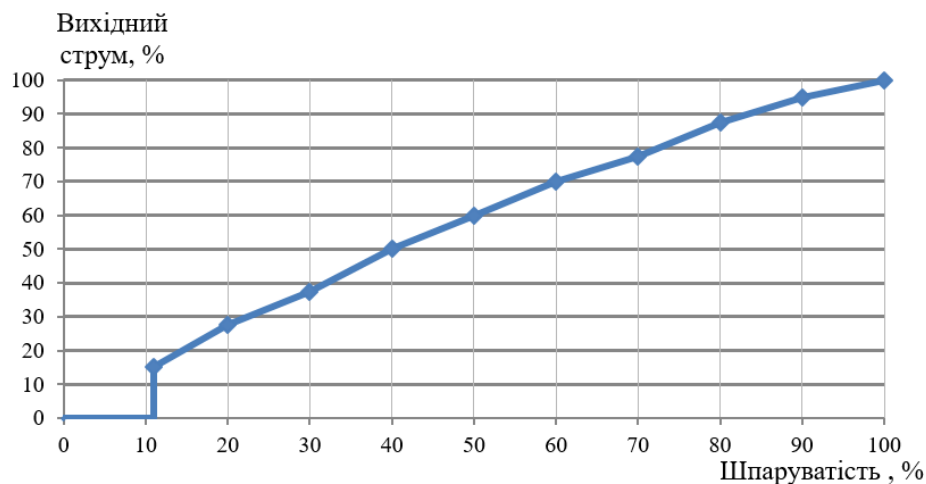


Рис. 5. Характеристика регулювання вихідного струму при ШІМ керуванні яскравістю світлодіодів

Світлодіоди є ідеальними джерелами світла, що забезпечують точну установку необхідної колірності. Колір можна змінювати шляхом змішування світла світлодіодів червоного, зеленого та синього світ-

ла (RGB). При змішуванні цих кольорів в світлодіодних світильниках з регульованою колірністю застосовується кілька ланцюжків світлодіодів червоного, зеленого та синього світла з регульованою яск-

равістю [20-21]. Для створення великої кількості колірних відтінків необхідно змінювати яскравість кожного світлодіодного каналу.

Таке регулювання здійснюється за допомогою зміни величини струму, що проходить через ці ланцюги.

Застосовуються два методи керування струмом:

- аналоговий (лінійний регулятор),
- ШІМ регулювання.

Ці методи реалізуються лінійними або імпульсними драйверами.

Цифрові інтерфейси застосовуються, як правило, в світильниках з централізованим керуванням, зокрема для внутрішнього освітлення приміщень.

Світлодіоди дозволяють реалізовувати енергоефективні рішення і одночасно покращувати якість світла. Виробники світильників тепер можуть інтегрувати світлодіодні джерела світла безпосередньо в світильники і в багатьох випадках більше немає фізичної різниці між джерелом світла і світильником. Системи освітлення стають більш функціональними, простішими в налаштуванні. Впровадження світлодіодних технологій дозволяє змінювати аналогову світлотехніку на цифрову, реалізуючи нову концепцію інтелектуальної системи освітлення (SLS).

Цьому сприяє прогрес в різних технологічних секторах, які зараз є частиною технології освітлення, зокрема можливістю керування інформацією, а також реалізацією зв'язку цифрових і аналогових технологій через Інтернет та ін.

Додатковими елементами, що полегшують реалізацію цих інновацій, є мініатюризація компонентів, які можуть бути інтегрованими в системи світлодіодних модулів, таких як датчики та бездротовий зв'язок [10, 12, 24].

При керуванні освітленням за допомогою нових активних інтерфейсів користувач безпосередньо може здійснювати ручне керування рівнем освітленості, корельованою колірною температурою, напрямком світла та ін. [25, 26].

Однак повністю ручне управління в складних ситуаціях може привести до хаотичного освітлення. Це відбувається, коли багато людей змінюють освітлення, і на це також можуть впливати фактори, які не залежать від людей, такі як зміна природного освітлення.

У випадку повністю автоматизованого керування системою освітлення рішення приймається на основі інформації отриманої від датчиків і у людини не має можливості впливати на світлове середовище. Автоматизована система освітлення зручна в ситуаціях, коли необхідно одночасно керувати кількома світильниками з різними світлотехнічними характеристиками. Крім того, автоматизована система може вибирати конкретне освітлення на основі досвіду, отриманого при попередніх налаштуваннях [12, 26].

Сьогодні перспективними є комбінації між ручними та автоматичними системами керування освітленням. При цьому можна знаходити баланс між освітленням яке зберігає автоматичні і ручні режими роботи для того, щоб забезпечувати певний рівень налаштування. Така гібридна схема дозволяє

людині взаємодіяти з системою, визначаючи характеристики освітлення.

Основні вимоги до систем керування освітленням: широкий діапазон входних змінних напруг та форм входних сигналів; високий ККД; відсутність мигтіння і ступінчастих переходів в нижній частині діапазону регулювання; відсутність погасання світла; плавне регулювання в діапазоні 0-100%; малий рівень нелінійних спотворень напруги; як можна менші спотворення коефіцієнту потужності; низький рівень електромагнітних перешкод і радіочастотних шумів; стабілізація струму і малий кидок пускового струму.

За останні роки наукові організації в усьому світі досліджують вплив природного освітлення на виробничі умови. Природне освітлення відіграє важливу роль для нормального самопочуття людей, що знаходяться в приміщенні [26, 27]. Віконні аксесуари такі як штори і жалюзі безпосередньо впливають на кількість світла, що проходить в приміщення. Тому вибір жалюзіта датчиків відіграють роль для забезпечення енергоефективності та комфорту освітлення в приміщенні [7].

Переналаштування жалюзі відносно падаючого на вікно світла призводить до суттєвої зміни рівнів освітленості і блискавості. Вибір датчиків і їх розміщення (у випадках використання фотоелектричних датчиків) є важливим питанням, так як можна запобігти небажаній блискавості і економити ЕЕ за рахунок природного освітлення.

Перспективним для регулювання та підвищення якості освітлення є використання штучного інтелекту [28, 29]. СО на основі штучного інтелекту може оптимізувати і налаштовувати параметри освітлення для позитивного впливу на сприйняття і комфорт людей. Алгоритми штучного інтелекту можуть бути розроблені для їх використання в окремому компоненті, наприклад, в датчику (у випадку децентралізованих рішень) або на сервері (для централізованих рішень).

Штучний інтелект відноситься до систем створених людиною і здатним інтерпретувати навколишнє середовище, в якому вони знаходяться, робити висновки і виконувати дії, що дозволяють досягати раніше визначених цілей.

Наприклад, камери, доповнені штучним інтелектом, можуть з високою достовірністю детектувати присутність і рух людей в кімнаті або просторі і надсилати сигнал на виконання певних дій (вмикати або вимикати світло). Штучний інтелект передбачає машинне навчання – здатність знаходити закономірності і приймати рішення на основі даних, які отримані із навколишнього середовища не будучи явно запрограмованими.

СО стають все більш складними і гнучкими в налаштуванні які потребують спеціальних знань і додаткових ресурсів. Тому в світлотехнічній галузі на всіх етапах життєвого циклу освітлення, від проектування до введення в експлуатацію і налаштування для кінцевого споживача ми матимемо справу як з контрольованими так і неконтрольованими проблемами машинного навчання.

Міжнародною асоціацією світлодизайнерів (IALD) опублікований технічний документ [5] в якому розкриті напрямки розробок орієнтованих на концепцію «освітлення для людини» (HCL) або інтерактивне освітлення. Системи HCL можуть автоматично регулювати інтенсивність та колірність світла впродовж дня, що сприяє підтриманню здоров'я функцій і ритмів [7, 27].

Це технологічне рішення стає все більш популярним для створення сприятливого світлового середовища для людей у різних сферах життя.

Висновки

1. Автоматичні системи керування освітленням є ефективними засобами економії електроенергії: їх впровадження дозволяє економити до 50% електроенергії на освітлення.

2. При проектуванні систем керування освітленням необхідно враховувати не тільки параметри енергоефективності, але і аспекти впливу освітлення на самопочуття та здоров'я людей, створення візуального комфорту, параметром безпеки, зокрема забезпечувати низький рівень мигтіння яскравості, вимоги Директив ЄС стосовно електромагнітної сумісності та ін.

3. Основні вимоги до систем керування освітленням світлодіодних джерел світла: широкий діапазон входних змінних напруг та форм входних сигналів; високий ККД; відсутність мигтіння і ступінчастих переходів в нижній частині діапазону регулювання; відсутність погасання світла; плавне регулювання в діапазоні 0-100%; малий рівень нелінійних спотворень напруги; як можна менші спотворення коефіцієнту потужності; низький рівень електромагнітних перешкод і радіочастотних шумів; стабілізація струму і малий кидок пускового струму.

4. Провідні виробники джерел живлення для світлодіодів застосовують два основних інтерфейси керування вихідним струмом (димінга): аналоговий і цифровий. Модуль живлення з аналоговим інтерфейсом широко використовується в системах освітлення з автономним керуванням: в системах вуличного освітлення, освітлення парковок та ін. Джерела живлення з цифровим інтерфейсом дозволяють керувати вихідним струмом за допомогою ШІМ і застосовуються, як правило, в світильниках з централізованим керуванням: для внутрішнього освітлення приміщень, системах архітектурного освітлення та ін.

5. Найбільш ефективним з точки зору стабільності параметрів є ШІМ метод регулювання. Але через нелінійну природу характеристичної кривої «струм – освітленість» для більшості світлодіодів традиційне ШІМ-регулювання не забезпечує максимальну світлову віддачу в усьому діапазоні. Потрібні нові технічні рішення для підвищення світової віддачі до рівня максимального значення в усьому діапазоні регулювання.

6. Однією з важливих проблем ШІМ-регулювання яскравості світла світлодіодних джерел є високий рівень мигтіння. Для безпечності світла при глибокому регулюванні необхідно щоб частота імпульсів струму була якомога вищою.

7. Перспективним шляхом підвищення енергоефективності та якості освітлення є створення інтелектуальних систем освітлення, які можуть автоматично регулювати інтенсивність та колірність світла впродовж дня, що сприяє підтриманню здоров'я біологічних ритмів.

8. Системи освітлення на основі штучного інтелекту можуть оптимізувати і налаштовувати параметри світла для позитивного впливу на людей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Commission Regulation (EU) 2019/2020 of 1 October 2019 laying down ecodesign requirements for light sources and separate control gears pursuant to Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Regulation (EC) No 244/2009, (EC) No 245/2009 and (EU) No 1194/2012 (Text with EEA relevance).
2. Commission Delegated Regulation (EU) 2019/2015 of 11 March 2019 supplementing Regulation (EU) 2017/1369 of the European Parliament and of Council with regard to energy labelling of light sources and repealing Commission Delegated Regulation (EU) No 874/2012 (Text with EEA relevance).
3. CIE 158:2009 Ocular lighting effects on human physiology and behaviour.
4. IES TM-18-18. (2011). Light and human health: An overview of the impact of light on visual, circadian, neuroendocrine and neurobehavioral.
5. Ladopoulos, I., & Shaw, K. (2017). IALD white paper: Lighting design for health, wellbeing and quality of light, a holistic approach on human centric lighting. IALD. Available at: <http://iald.org/News/Reflections-Newsletter/IALD-REFLECTIONS-24-February-2017>. Accessed May 8, 2018.CIE
6. IALD. (2017, February). Joint position paper by LightingEurope and the International Association of Lighting Designers (IALD) on Human Centric Lighting. Available at: <https://www.iald.org/Advocacy/Publications>. Accessed September 30, 2018.
7. Rossi M. Circadian Lighting Design in the LED Era. Cham : Springer International Publishing, 2019. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-11087-1>.
8. Caicedo, D., Li, S., & Pandharipande, A. (2017). Smart lighting control with workspace and ceiling sensors. *Lighting Research and Technology*, 49(4), 446–460. <https://doi.org/10.1177/1477153516629531>.
9. Neida, B. V., Manicria, D., & Tweed, A. (2001). An analysis of the energy and cost savings potential of occupancy sensors for commercial lighting systems. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 30(2), 111–125. <https://doi.org/10.1080/00994480.2001.10748357>.
10. Meughevel, N., et al. (2014). Distributed lighting control with daylight and occupancy adaptation. *Energy and Buildings*, 75, 321–329. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.016>.

11. Yeh, L., et al. (2010). Autonomous light control by wireless sensor and actuator networks. *IEEE Sensors Journal*, 10(6), 1029–1041. <https://doi.org/10.1109/jsen.2010.2042442>.
12. Casambi. (2018). Lighting control for the modern world. The most robust, cost effective and future proof wireless lighting control solution. Available at: <https://casambi.com/> (Retrieved: October 21, 2018).
13. Leitner, G. (2015). The future home is wise, not smart: A Human-centric perspective on next generation domestic technologies (1st ed. 2015 ed). Cham, a: Springer
14. Gonzalez, L. I. L., Troost, M., & Amft, O. (2013) Using a thermopile matrix sensor to recognize energy-related activities in offices. *Procedia Computer Science*, 19, 678–685. [In The 4th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2013), the 3rd International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2013)]. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.06.090>.
15. Berson D. M Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock / D. M. Berson, F. A. Dunn, M. Takao // *Science*. – 2002. – Vol. 295. – P. 1070.
16. Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor / G. Brainard, J. Hanifin, J. Greeson, B. Byrne, G. Glickman, E. Gerner, M. Rollag // *Journal of Neuroscience*. – 2001. – Vol. 21. – No. 16. – P. 6405.
17. Thapan K. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans / K. Thapan, J. Arendt, D. Skene // *J. Physiol.* – 2001. – Vol. 535 (pt 1). – P. 261.
18. ДСТУ EN IEC 63128:2022 Інтерфейс управління освітленням для регулювання яскравості. Аналоговий інтерфейс регулювання напруги для електронних пристроїв керування джерелом струму
19. ДСТУ EN IEC 62386-105:2022 Цифровий адресний інтерфейс освітлення. Частина 105. Особливі вимоги до апаратури керування. Передавання мікропрограмного забезпечення (EN IEC 62386-105:2020, IDT; IEC 62386-105:2020, IDT)
20. Kun-Che Ho, Shun-Chung Wang and Yi-Hua Liu. Dimming Techniques focusing on the improvement in luminous efficiency for High-brightness LED's // *Electronics* 2021. №10, P.2161.
21. Manish Kumar Barwar, Lalit Kumar Sahu, Prabhat Ranjan Tripathi, Ranchi, Pallavee Bhatnagar, Hema Chander Allamsetty. Krishna Kuar Gupta, Josep M. Guerrero Demystifying the Devices Behind the LED Light in Published in: *IEEE Industrial Electronics Magazine* (Early Access) Page(s):2-13 Date of Publication: 16 May 2022.
22. Горшков В.В. Энергоэффективный электротехнический комплекс с элементами интеллектуального управления процессом освещения улиц населенных пунктов: монография. (под редакцией проф. О.М. Сінчука). - 2023. - 94 с.
23. Philips Hue. (2012). The definition of smart lighting. Available at: <https://www.google.com/search?q=philips+hue&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b> (Retrieved: October 25, 2018).
24. Floyd, D., et al. (1995). Energy efficiency technology demonstration project for Florida educational facilities: Occupancy sensors. FSEC-CR-867-95.
25. Newsham, G., et al. (2004). Effect of dimming control on office worker satisfaction and performance. In *Proceedings of the IESNA Annual Conference*. Tampa, New York: Illuminating Engineering Society of North America.
26. Newsham, G. R., et al. (2008). Individual control of electric lighting in a Daylit space. *Lighting Research & Technology*, 40(1), 25–41. <https://doi.org/10.1177/1477153507081560>.
27. Rea, M. S., Figueiro, M. G., & Bullough, J. D. (2002). Circadian photobiology: an emerging framework for lighting practice and research. *Lighting Research & Technology*, 34(3), 177–187. <https://doi.org/10.1191/1365782802lt0570a>.
28. Davila J. The Impact of Artificial Intelligence (AI) in LED Lighting / J. Davila // *ISSUU from designing lighting*. April 2021.
29. Візір Ю. С. Штучний інтелект у системах управління освітленістю / Ю. С. Візір // *Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023)* : збірник студентських наукових статей. – Харків : ХНУРЕ, 2024. Вип. 1. С. 7-12.

Received (Надійшла) 15.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.10.2024

Automatic lighting control systems - an effective way to save electricity and improve lighting quality

D. Kyslytsia, Y. Basova, S. Kyslytsia, H. Kozhushko, R. Zakharchenko

Abstract. This paper examines the typical functions of lighting control systems and the prospects for their development using modern advancements in LED technology, the miniaturization of components such as sensors that can be integrated into LED modules, the use of wireless communication, and the capability of managing information via the Internet. The main typical functions of automatic lighting control systems include: maintaining artificial lighting in indoor spaces at an appropriate visual level; reducing the power consumption of lighting systems by utilizing natural lighting; reducing the power consumption of lighting systems by optimizing their use at every moment, particularly on weekends and holidays, depending on the presence of people in the room, etc.; combined lighting control, which uses both manual and automated methods, allowing the determination of lighting parameters while considering individual consumer preferences; selection of lighting parameters based on previous settings data, which can improve the lighting environment; provision of lighting parameters aligned with the concept of integrative lighting ("lighting for people," HCL) by automatically adjusting the level of illumination and color of light throughout the day, etc. Lighting control systems are primarily based on the use of time, presence, and light level sensors, or combined sensors that integrate these functions. In global practice, two main output current control interfaces are used for automatic lighting control: analog and digital. This article provides information on the features of adjusting LED parameters using analog and digital interfaces, examines certain issues in the creation of intelligent lighting systems, and explores the prospects of using artificial intelligence in lighting systems. Conclusions are drawn regarding the energy efficiency of automatic lighting control systems, the basic requirements for their parameters, and future development prospects.

Keywords: LED lamps, lighting control systems, flickering, dimming, pulse width modulation.

В. І. Носков, С. Ю. Гавриленко, М. В. Гейко, В. І. Панченко

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

КОНТРОЛЬ ВИКОРИСТАННЯ ПОТУЖНОСТІ ДИЗЕЛЯ НА ТЯГУ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДІВ

Анотація. Об'єктом дослідження є процес контролю використання потужності дизеля на тягу. Предметом дослідження є методи перевірки використання потужності дизеля на тягу. Метою статті є підвищення ефективності роботи дизель-поїзда ДЕЛ-02 при його експлуатації. Отримано такі результати. Досліджено процес функціонування дизель-поїзда ДЕЛ-02 при застосуванні електропередачі з тяговими асинхронними двигунами (ТАД). Отримано, що такій передачі властиві технічні та економічні переваги у порівнянні з традиційними електропередачами з тяговими двигунами постійного струму. В той же час, реалізація цих переваг потребує вирішення ряду проблем, до яких слід віднести створення сучасних систем контролю та діагностики (СКД) стану тягового обладнання. З цією метою до складу електропередачі дизель-поїзда введена СКД, яка виконана на базі персонального комп'ютера зі спеціальним програмним забезпеченням. Ця система виконує порівняння розрахункових значень основних параметрів електропередачі (потужність, тяга, прискорення та ін.) з їх реальними значеннями і надає інформацію машиністу. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробці методу перевірки використання потужності дизеля на тягу в умовах експлуатації, який відрізняється від відомих розробкою системи контролю та діагностики стану тягового обладнання, що дозволило підвищити ефективність роботи дизель-поїзда при його експлуатації.

Ключові слова: електропередача, тяговий асинхронний двигун, система контролю і діагностики.

Вступ

Застосування в електропередачах локомотивів ТАД у порівнянні з двигунами постійного струму дозволяє підвищити потужність встановленого обладнання (при тій же масі), зменшити динамічні впливи на екіпаж та колію, підвищити точність, технологічність, знизити вартість і експлуатаційні витрати. В той же час, наявність достатньо складного обладнання і можливі негативні наслідки його відмов, обумовлюють необхідність створення сучасної СКД тягового обладнання для раннього виявлення несправностей. Рішення цієї задачі потребує використання методів і алгоритмів інтелектуальної діагностики та засобів з використанням мікропроцесорних систем (МПС).

Аналіз літератури. Тягово-енергетичні розрахунки є однією з основних задач, які треба вирішувати для ефективного управління процесами перевезення на залізниці. Ці розрахунки для визначення енергозаощаджуючих траєкторій руху локомотива передбачають пошук раціональної залежності витрат енергоресурсів із часом при русі поїзда [1 – 4], а їх результати будуть достовірними тільки при належній якості роботи основних складових енергетичної системи.

Режим ведення локомотива можна розбити на фази:

- пуск та розгін до виходу на обрану ходову характеристику;
- рух при включених ТАД;
- рух на вибігу при вимкнених ТАД і регульовальне гальмування на спусках для того, щоб підтримати швидкість на заданому рівні;
- гальмування для зниження швидкості локомотива перед зупинками.

При профілі шляху, на якому чергуються підйоми, спуски, горизонтальні ділянки, доцільно вести локомотив при включеному контролері – при цьому

регулювання швидкості руху здійснюється шляхом зміни сили тяги [5].

Стратегія обслуговування локомотивів з переходом від планово-попереджувального обслуговування до обслуговування і ремонту з урахуванням технічного стану передбачає наявність бортової СКД. При цьому повинен дотримуватись принцип достатності, який регламентує використання наявних в системі керування датчиків зворотних зв'язків. На теперішній час немає єдиного системного підходу до питань діагностики рухомого складу, тому постійно продовжуються розробки нових засобів та методів контролю.

Тягова електропередача дизель-поїзда здійснює передачу потужності дизеля до рушійних колес і належить до основних складових, які визначають якість роботи локомотива. Електропередача поїзда з ТАД містить МПС керування, що дає можливість одночасного створення СКД стану тягового обладнання з використанням засобів обчислювальної техніки. Наявність такої складової в системі керування електропередачі дозволяє виконувати безперервний контроль функціонування електропередачі при експлуатації не порушуючи штатної роботи дизель-поїзда та інформувати машиніста про відхилення параметрів від нормативних. В даному випадку контролю підлягають: потужність дизеля по позиціях контролера машиніста, використання вільної потужності дизеля на тягу, реалізація тягових характеристик дизель-поїзда та їх показників: швидкість, прискорення та ін.

При розробці бортових систем локомотивів використовуються МПС із застосуванням різних датчиків. Для ефективної роботи цих систем необхідна висока швидкість обміну, висока вірогідність і низький рівень помилок передачі інформації.

В якості високопродуктивного і надійного інтерфейсу для обміну даними між різними блоками системи управління і діагностування використовується протокол CAN (Controller Area Network). Цей вибір

зумовлений високою перешкодозахищеністю, можливістю розвитку та відносною простотою реалізації [6]. Основною рисою цього протоколу є можливість працювати на основі техніки розподілених повідомлень – інформація, передана в мережі, доступна для прийому будь-яким вузлом системи, який приймає рішення про обробку або ігнорування повідомлення. Передача повідомлення в мережі CAN може бути ініційована будь-яким вузлом мережі при вільній шині, вузли можуть обмінюватися інформацією між собою.

В статті розглядається задача безперервного контролю якості роботи тягової електропередачі дизель-поїзда без впливу на її функціонування в процесі руху.

Для вирішення цієї задачі проведено:

- аналіз схеми тягової електропередачі та її системи керування;
- розгляд наявних сигналів зворотних зв'язків системи керування для їх використання в СКД;
- розробка методів та алгоритмів контролю якості роботи електропередачі в штатних режимах експлуатації дизель-поїзда.

Основна частина

Локомотиви однієї серії, які працюють в однакових умовах, можуть мати суттєві розбіжності в тягових характеристиках, потужності та паливній економічності внаслідок розходження їх технічного стану. Ці розбіжності виникають в результаті нормативних допусків на ремонт, знос, в результаті неузгодженості ланок управління дизель-генератора та ін. Втрати потужності та сили тяги можуть виникати при розбіжності потужностей агрегатів, які працюють паралельно на загальне навантаження.

Нерівномірність розподілу струмів, навантажень між ТАД, що працюють паралельно на загальне навантаження, відбувається в результаті розкиду їх швидкісних характеристик. При цьому виникає боксування, перегрів перевантажених двигунів, зниження тягового зусилля і коефіцієнта корисної дії (ККД) тягової передачі. Фактичні режими та тягові показники можуть бути визначені з достатньою достовірністю лише на основі тягово-експлуатаційних випробувань локомотивів на різних ділянках

Таблиця 1 – Потужність дизель-генератора

№ позиції КМ	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Обороти дизеля, об/хвил.	800	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2100
Потужність синх-ронного генератора, P_r , кВт	68,5	72	129	191,7	250	330	381	441	462,3
Сигнал регулятора дизеля, e_{pd} , В	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0

На рис. 1 показана функціональна схема системи регулювання і контролю параметрів моторного вагона поїзда ДЕЛ-02 і наведені такі позначення: АІН ПЧ – автономний інвертор-перетворювач частоти; КМ – контролер машиніста; $n_{км}$ – номер позиції КМ; U_1, U_2, f_1, f_2 – завдання параметрів ПЧ; $n_{дз}, N_{дз}$ – сигнали завдання частоти обертання та потужності дизеля; n_d, N_d – вихідні частота обертання та потужність дизеля; U_2, f_2 – напруга і частота генератора; U_{pd} – коригуючий сигнал потужності дизеля; I_{d1}, I_{d2}

шляху [7, 8].

При експлуатації автономних локомотивів параметри електропередачі можуть відхилятися від нормативних, що призводить до зниження ефективності та до відмов у роботі локомотива. Для запобігання таких випадків СКД повинна використовувати наявні сигнали зворотних зв'язків без введення додаткових пристроїв виміру параметрів, виконувати оцінку якості роботи електропередачі. З цією метою система, яка реалізована на базі персонального комп'ютера, з використанням розроблених математичних моделей, в реальному часі проводить розрахунки електропередачі та порівнює їх з реальними. При наявності розходжень в роботі системи електропередачі ця інформація доводиться до машиніста.

Для розробки математичних моделей і проведення розрахунків були використані основні параметри дизель-поїзда:

- складеність дизель-поїзда: два головних (моторних) вагона і один причіпний;
 - осьова формула головного вагона: $2_0 - 2_2$;
 - діаметр колеса по колу кочення: 0,95 м (при нових бандажах);
 - маса тари з екіпіровкою: не більше 64 т головного (моторного) вагона і 45 т причіпного;
 - кількість місць для сидіння: не менше 344.
- Тягова передача забезпечує:
- конструкційну швидкість 130 км/г;
 - пускову силу тяги 137 кН;
 - силу тяги тривалого режиму при вимкненому енергопостачанні 54,8 кН;
 - загальний ККД електропередачі в тривалому режимі (при ККД випрямляча та інвертора 0,975) не менше 0,825;
 - максимальне прискорення поїзда при розгоні до швидкості 25 км/г, завантаженню по числу місць для сидіння і 66% маси екіпірувальних матеріалів на прямій горизонтальній ділянці шляху – не менше 0,4 м/с².

На дизель-поїзді ДЕЛ-02 використовується приводний модуль Pover Pack 12V 183 DE фірми MTU (Німеччина) з електронним регулятором ECS-183/1. Потужність дизель-генератора по позиціям контролера машиніста наведена в табл. 1.

– значення активного струму ТАД1 і ТАД2; i_3 – струм збудження генератора; $f_{d1}, f_{d2}, U_{d1}, U_{d2}$ – частоти та напруги живлення ТАД1 і ТАД2; t_{d1}, t_{d2} – температура ТАД1 і ТАД2; n_1, n_2 – частоти обертання роторів ТАД1 і ТАД2; I_{s1}, I_{s2} – значення повного струму ТАД1 і ТАД2 [9].

Аналіз схеми тягової електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02 (рис. 1) показує, що вона виконана двохконтурною:

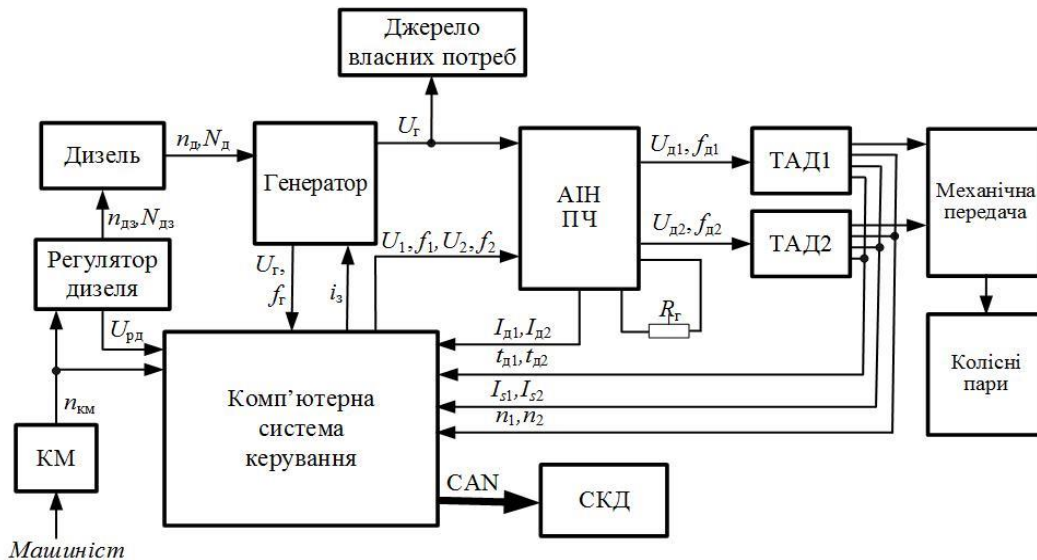


Рис. 1. Функціональна схема системи регулювання і контролю параметрів моторного вагона поїзда ДЕЛ-02

– перший контур забезпечує необхідні характеристики тягового синхронного генератора у всьому діапазоні роботи поїзда,

– другий контур забезпечує живлення ТАД від ПЧ.

МПС керування використовує необхідну кількість сигналів зворотних зв'язків, які характеризують параметри електропередачі. Ці сигнали також заведені в СКД і дозволяють виконувати необхідні розрахунки. Потужність, яку розвиває дизель, визначається за виразом:

$$P_{\text{диз}} = P_{\text{ен}} + P_{\text{он}} + P_{\text{он}}, \quad (1)$$

де $P_{\text{ен}}$ – потужність електропередачі; $P_{\text{он}}$ – потужність допоміжних потреб; $P_{\text{он}}$ – потужність опалення пасажирських салонів.

Потужність, яку використовує електропередача, розраховується за формулою:

$$P_{\text{диз}} = \frac{U_{\text{д}} \cdot I_{\text{д}}}{\eta_{\text{г}} \cdot \eta_{\text{ву}}}, \quad (2)$$

де $U_{\text{д}}$, $I_{\text{д}}$ – значення напруги і струму на виході випрямної установки; $\eta_{\text{г}}$, $\eta_{\text{ву}}$ – ККД генератора і випрямної установки.

Отримана розрахунковим шляхом потужність дизеля порівнюється з її значенням згідно з даними, які наведені в табл. 1. Наявність чи відсутність відхилення потужності дизеля від нормативних значень також підтверджується сигналами з електронного регулятора дизеля ($U_{\text{рд}}$), який повинен дорівнювати 5 В. Відхилення цього значення в ту чи іншу сторону показує або перевантаження дизеля ($U_{\text{рд}} < 5 \text{ В}$), або недовикористання його потужності ($U_{\text{рд}} > 5 \text{ В}$).

Оцінка якості використання потужності дизеля на тягу виконується за допомогою математичної моделі дизель-поїзда, яка може бути представлена основним рівнянням руху дизель-поїзда:

$$J \frac{dw}{dt} = M_m - M_o, \quad (3)$$

де J – момент інерції ($J = mR_k^2$); m – маса поїзда; R_k – радіус колеса; w – кутова швидкість колеса ($w = V / R_k$); V – швидкість руху поїзда; M_m – момент тяги; M_o – момент опору руху.

Після отримання сигналів зворотних зв'язків із системи керування маємо:

$$F = G \cdot (102 \cdot (1 + \gamma) \cdot a + W_0), \quad (4)$$

де F – тягове зусилля; G – вага дизель-поїзда; $(1 + \gamma)$ – коефіцієнт інерції обертюв мас ($\gamma = 0,1$), a – прискорення; W_0 – опір руху дизель-поїзда. Також:

$$F = \frac{P_k}{3,6 \cdot V}, \quad (5)$$

де P_k – потужність на тягових вісях дизель-поїзда, яка знаходиться за виразом:

$$P_k = P_{\text{ву}} \cdot \eta_{\text{аі}} \cdot \eta_{\text{ред}}, \quad (6)$$

де $\eta_{\text{аі}}$, $\eta_{\text{ред}}$ – ККД автономного інвертора і редуктора відповідно.

На рис. 2 наведена тягова характеристика дизель-поїзда – це залежність сили тяги від швидкості руху при різних режимах роботи тягових двигунів в межах обмежень за надійністю, стійкістю і безпекою руху.

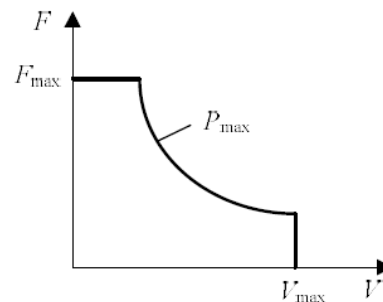


Рис. 2. Тягова характеристика дизель-поїзда для максимальної потужності дизеля (F_{max} , P_{max} , V_{max} – максимальні значення тяги, потужності та швидкості відповідно)

Найбільша величина сили тяги необхідна при торканні поїзда з місця, при наборі швидкості та при русі найбільш крутим підйомом [10]. Момент опору в процесі руху поїзда обчислюється рівнянням:

$$M_o = i \cdot R_k \cdot W_o \cdot G, \quad (7)$$

$$W_o = 1,1 + 0,012 \cdot V + 0,00025 \cdot V^2, \quad (8)$$

де i – коефіцієнт схилу, який відомий для конкретного відрізка шляху, на якому проводяться дослідження (для горизонтальної ділянки $i = 1$).

Отримане значення тяги порівнюється з тяговою характеристикою дизель-поїзда і має відповідати їй у всьому діапазоні швидкостей.

На рис. 3 наведена функціональна схема моделі блоку обчислення тяги.

Згідно з виразом (4) обчислюється значення прискорення руху дизель-поїзда, яке потім порівнюється з реальним (збіг цих значень підтверджує якість роботи мотор-колісних блоків дизель-поїзда). Цей метод був використаний в системі управління і контролю електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02.

Висновки

Проведено аналіз схеми тягової електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02 та її системи керування.

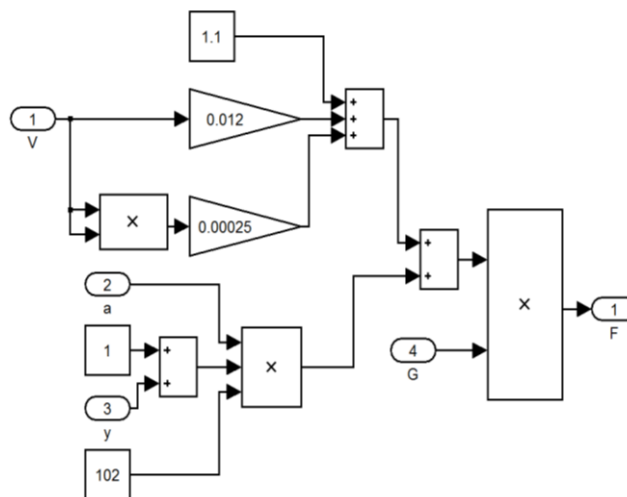


Рис. 3. Функціональна схема моделі блоку обчислення тяги

Результати аналізу з урахування особливостей схеми тягової електропередачі і ППС керування дозволили розробити метод перевірки використання потужності дизеля на тягу в умовах експлуатації, який був впроваджений в розробку СКД дизель-поїзда ДЕЛ-02. Ця система виявилась ефективною в процесі виконання налагоджувальних робіт на дизель-поїздах ДЕЛ-02, а також при їх експлуатації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Розроблення алгоритмів формування енергооптимальних режимів руху поїздів / М.Г. Притула, О.А. Пасечник // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного ун-ту залізн. трансп. – № 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. – Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – Д., 2012. – Вип. 42. – С. 110 – 113.
3. Мозолевич Г.Я., Троян А.В. Енергоефективне керування поїздопотоком як засіб удосконалення перевізного процесу / Збірник наукових праць ДНУЗТ «Транспортні системи та технології перевезень» – Вип. 10. – 2015. – С. 80 – 87.
4. Щербак Я.В. Аналіз варіантів вибору критерію оптимізації енерговитрат на тягові потреби рухомого складу залізниць / Я.В. Щербак, В.П. Нерубацький // Збірник наукових праць УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 127. – С. 137 – 142.
5. Кислий Д.М. Визначення енергоощаджуючих режимів ведення поїздів / Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – № 1 (61). – 2016. С. 71 – 84.
6. Боднар Є.Б. Основні вимоги та принципи створення бортових систем діагностування локомотивів / Є.Б. Боднар. – Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту залізн.транспорту, 2014, № 1 (49). – С. 68 – 74.
7. 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, 2017. – № 3 (233). – с. 31 – 35.
8. 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.
9. 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: НУ «ПП», 2021. – Вип. 3 (65). – С. 56 – 59.
10. Основи електричної тяги: навч. посібник / В.Х. Далека, П.М. Пушков, В.П. Андрійченко, Ю.В. Мінеєва // Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків: ХНАМГ, 2012. – 312 с.

Received (Надійшла) 22.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.11.2024

Control of the use of diesel power for traction in the conditions of operation of diesel trains

Valentin Noskov, Svitlana Gavrylenko, Maksym Heiko, Volodymyr Panchenko

Abstract. The object of the study is the process of controlling the use of diesel power for traction. The subject of the study is methods of checking the use of diesel power for traction. The purpose of the article is to increase the efficiency of the DEL-02 diesel train during its operation. The following results were obtained. The process of operation of the DEL-02 diesel train when using power transmission with traction asynchronous motors (TAD) was studied. It was found that such a transmission has technical and economic advantages in comparison with traditional electrical transmissions with DC traction motors. At the same time, the realization of these advantages requires the solution of a number of problems, which include the creation of modern control and diagnosis systems (CDS) of the state of the traction equipment. For this purpose, an CDS was introduced into the diesel train's power transmission, which is made on the basis of a personal computer with special software. This system compares the calculated values of the main transmission parameters (power, traction, acceleration, etc.) with their real values and provides information to the driver.

Keywords: power transmission, traction asynchronous motor, control and diagnostics system.

П. Е. Решетнікова, О. Ю. Заковортний

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

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВЕРТИКАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ РУХОМОГО СКЛАДУ, ВИКЛИКАНИХ НЕРІВНОСТЯМИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

Анотація. Під час руху поїзда залізничною колією виникають коливання вагонів та їх складових, що призводить до зниження швидкості рухомого складу, зношення його частин та некомфортних та потенційно небезпечних для пасажирів ситуацій. У роботі розглядаються причини та наслідки коливань рухомого складу. Отримано математичну модель вертикальних коливань (підстрибування та галопування) візків та кузова вагона, викликаних вертикальною двогорбою нерівністю колії. Розроблені комплексна математична та імітаційна моделі дозволяють досліджувати залежності цих коливань рухомого складу від швидкості рухомого складу, якості рейок та показників гасників коливань, наявних у поїзді, а також в подальшому можуть бути використані у системах підтримки прийняття рішень (СППР) бортових систем керування на залізничному транспорті України.

Ключові слова: математична модель, система підтримки прийняття рішень, бортові системи керування, руханий склад, коливальний процес, підстрибування, галопування.

Вступ

Постановка проблеми. Незважаючи на відносно поширеність високошвидкісних магістралей у країнах Європи, середня швидкість пасажирських поїздів України становить приблизно 50 км/год. Найшвидшими є потяги «Інтерсіті» та «Інтерсіті+» з максимальною швидкістю до 160 км/год, хоча в дійсності показники значно нижчі. Середня швидкість складає близько 95 км/год. Лише на деяких напрямках, таких як Київ-Харків та Київ-Львів, інколи швидкість цих поїздів сягає 110 км/год. Низька швидкість руху поїздів викликається здебільшого зношеністю колій, які знаходяться в критичному стані [1, 2].

Під час руху поїзда залізничною колією виникають складні коливальні рухи вагонів та інші нерівномірні рухи інерційних мас, які входять до загальної механічної системи рухомого складу.

Колівання поїзда зумовлюються нерівностями шляху, наявністю зазорів на стикових рейкових з'єднаннях, конусністю поверхні катання колісних пар, а також наявністю нерівностей на цій поверхні, стилями рейок, типом ресорного підвішування та іншими факторами. У сучасних вагонах встановлені механічні гасителі коливань, які виконують функцію зменшення впливу динамічних зусиль і забезпечують більш плавний рух поїзда, проте дія цих збуджень все одно призводить до того, що колісні пари вагона приходять в коливальний стан та передають ці коливання іншим складовим рухомого складу.

Колівальні процеси у свою чергу зумовлюють виникнення динамічних сил, відхилень від положення рівноваги, інерційних перенавантажень. Вони можуть викликати дискомфорт пасажирів, що веде за собою зниження привабливості переміщення залізницею серед користувачів. Безпека – ще одна критична сфера, на яку впливають коливання вагона. Сильні коливання можуть збільшити ризик сходження з рейок, особливо коли поїзди рухаються по кривих або на високих швидкостях. Крім того, повторювані вертикальні навантаження від коливань можуть призвести до втоми та виходу з ладу основних компонентів, тим самим ставлячи під загрозу загальну безпеку поїзда.

Структурна цілісність як рухомого складу, так і колійної інфраструктури також страждає через ці коливання. Підвищений знос від постійних вертикальних рухів прискорює деградацію цих компонентів, що призводить до збільшення витрат на обслуговування та заміну. Це, у свою чергу, може спричинити частіше перебої в обслуговуванні, що ще більше порушить роботу залізниці.

Колівання також впливають і на загальну продуктивність перевезення залізницею. Щоб пом'якшити вплив вертикальних коливань, можуть бути введені обмеження швидкості, що знижує ефективність і пропускну здатність залізничної мережі. Крім того, необхідність посиленого технічного обслуговування може призвести до більш частих перебоїв у обслуговуванні, спричиняючи затримки та незручності для пасажирів. Нарешті, вертикальні коливання сприяють підвищенню рівня шуму, що може бути проблематичним як для пасажирів, так і для сусідніх громад. Підвищена вібрація також може вплинути на навколишні конструкції, викликаючи проблеми з навколишнім середовищем [3, 4]. Високочастотна вібрація викликає проблеми зі здоров'ям у пасажирів та працівників залізниці.

Таким чином, вертикальні коливання рухомого складу мають багатогранний негативний вплив на рух поїздів, який включає в себе вплив на комфорт пасажирів, безпеку, цілісність конструкції, експлуатаційні характеристики та навколишнє середовище. Вирішення цих проблем відіграє велику роль у підтримці безпечної, ефективної та комфортної залізничної системи.

Комплексна математична модель дизель-поїзда повинна враховувати різні види коливань рухомого складу, зокрема підстрибування та галопування.

Це, у свою чергу, дасть можливість досліджувати на комплексній математичній моделі причини коливань, їх характер і взаємний вплив, а також визначати закони оптимального управління для вирішення завдань оптимізації витрат енергії рухомих складом та визначати умови стійкого та безпечного руху поїзда залізничними перегонами з нерівностями. Крім цього, комплексна математична модель

дозволить проводити описані вище дослідження не лише на швидкостях руху рухомого складу, які прийняті на сьогоднішній день залізницями України (до 100 км/год), а й на швидкостях властивих швидкісному руху поїздів. Це дозволить уточнити для підвищених швидкостей руху поїздів результати досліджень коливань вагонів, які безпосередньо залежать, з одного боку, від швидкості руху рухомого складу, т.к. зі збільшенням маршрутних швидкостей руху поїздів по залізничним перегонам збільшується амплітуда і частота коливань, з другого боку, від якості залізничного покриття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробкою математичних моделей поїздів займається багато вчених. Існуючі математичні моделі дозволяють виконувати на них дослідження руху поїзда у різних його режимах, електромагнітних процесів, які відбуваються у двигунах, а також, у разі представлення поїзда як багатомасової системи, взаємодію між різними частинами рухомого складу [5–7].

Низку робіт було присвячено питанням коливання рухомого складу та його складових [6, 8–12]. Більшість вчених приділяють увагу поперечним коливанням вагона, таким як виляння та бічний винос вагона, які виникають природним шляхом у процесі руху [4, 6–12]. Однак через нерівності залізничного полотна та неідеальність компонентів поїзда виникають також інші види коливань, які зі збільшенням швидкостей перевезення можуть не тільки зменшувати рівень комфорту пасажирів, а й становити загрозу їх життю та безпеці.

Хоча повздовжні та вертикальні коливання іноді і знаходять своє місце у роботах деяких авторів, їх роль у таких публікаціях носить нечисленний, обмежений характер [8, 9].

Метою статті є розробка математичної моделі дизель-поїзда, яка враховує підстрибування та

$$\begin{aligned} m_b \ddot{z}_{b1} - \beta_2 (\dot{z}_k - \dot{z}_{b1} - l_k \dot{\varphi}_k) - c_2 (z_k - z_{b1} - l_k \varphi_k) + 2\beta_1 \dot{z}_{b1} + 2c_1 z_{b1} &= \beta_1 (\dot{\eta}_1 + \dot{\eta}_2) + c_1 (\eta_1 + \eta_2); \\ m_b \ddot{z}_{b2} - \beta_2 (\dot{z}_k - \dot{z}_{b2} - l_k \dot{\varphi}_k) - c_2 (z_k - z_{b2} - l_k \varphi_k) + 2\beta_1 \dot{z}_{b2} + 2c_1 z_{b2} &= \beta_1 (\dot{\eta}_3 + \dot{\eta}_4) + c_1 (\eta_3 + \eta_4); \\ J_{by} \ddot{\varphi}_{b1} + 2l_b^2 \beta_1 \dot{\varphi}_{b1} + 2l_b^2 c_1 \varphi_{b1} &= l_b \beta_1 (\dot{\eta}_1 - \dot{\eta}_2) + l_b c_1 (\eta_1 - \eta_2); \\ J_{by} \ddot{\varphi}_{b2} + 2l_b^2 \beta_1 \dot{\varphi}_{b2} + 2l_b^2 c_1 \varphi_{b2} &= l_b \beta_1 (\dot{\eta}_3 - \dot{\eta}_4) + l_b c_1 (\eta_3 - \eta_4); \\ m_k \ddot{z}_k - \beta_2 (2\dot{z}_k - \dot{z}_{b1} - \dot{z}_{b2}) - c_2 (2z_k - z_{b1} - z_{b2}) &= 0; \\ J_{ky} \ddot{\varphi}_k + \beta_2 l_k (2l_k \dot{\varphi}_k - \dot{z}_{b1} - \dot{z}_{b2}) + c_2 l_k (2l_k \varphi_k - z_{b1} - z_{b2}) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де m_b – маса візка; m_k – маса кузова; J_{by} – приведений момент інерції візка; J_{ky} – момент інерції кузова; $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ – нерівності залізничного полотна під першою та другою колісною парою візка

В якості вихідної нерівності колії було прийнято двогорбу нерівність. Для кожної колісної пари, окрім першої за ходом руху поїзда, вона задана зі зсувом часу виходячи з розмірів баз візків і кузова.

Запис функції, що описує дану нерівність, має вигляд:

$$\eta = a_1 \sin(\omega t + \delta) + a_2 \sin(3\omega t + \delta), \quad (2)$$

де $\omega = \frac{2\pi V}{L_d}$ – частота впливу стиків шляху за швидкості руху вагона, V – швидкість руху поїзда, L_d – довжина хвилі нерівності, a_1, a_2 – амплітуди гармонік двогорбої нерівності.

галоупування візків вагона, що викликані нерівностями залізничної колії.

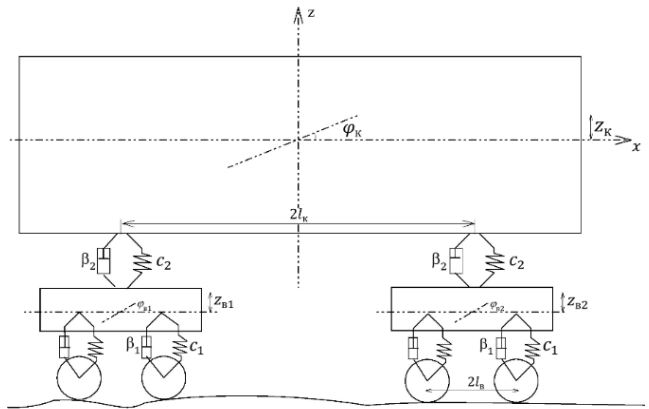


Рис. 1. Розрахункова схема коливань вагона у вертикальній повздовжній площині
 β_1, β_2 – коефіцієнти в'язкого тертя ресорного та центрального підвішування відповідно; c_1, c_2 – жорсткості ресорного та центрального підвішування відповідно; z_{b1}, z_{b2}, z_k – підстрибування візка; $\varphi_{b1}, \varphi_{b2}, \varphi_k$ – галоупування візка та кузова; l_b, l_k – половина відстані між колісними парами візка та між візками кузова

Виклад основного матеріалу

У роботі розглядається коливання вагона пасажирського дизель-поїзда, що має осьову формулу 2–2 та двоступінчасте ресорне підвішування. На рис. 1 наведено приклад розрахункової схеми, яка відповідає коливанням підстрибування та галоупування такого вагона.

Розглянемо цю розрахункову схему як двухмасову систему та запишемо для неї систему диференціальних рівнянь коливань кузова та візків вагона з урахуванням нерівностей колії під кожною з наявних колісних пар.

Фазовий зсуви для нерівностей для кожної колісної пари відповідно дорівнюють:

$$\delta_1 = 0, \delta_2 = \frac{2\pi}{L_d} 2l_b, \delta_3 = \frac{2\pi}{L_d} 2l_k, \delta_4 = \frac{2\pi}{L_d} (2l_k + 2l_b).$$

Для перевірки результатів було складено модель, яка включає в себе рівняння підстрибування та галоупування візків та кузова вагона (1), які зазнали простих математичних перетворень, рівнянь нерівності залізничної колії (2), а також модель руху поїзда з одним еквівалентним тяговим двигуном [6].

$$\frac{ds}{dt} = k_1 V;$$

$$\frac{dv}{dt} = k_2 (\Psi_{\alpha 2} \Psi_{\beta 1} - \Psi_{\alpha 1} \Psi_{\beta 2}) - a_0 - a_1 V - a_2 V^2;$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_{\alpha 1}}{dt} &= U_\alpha - a_s \Psi_{\alpha 1} + a_s k_r \Psi_{\alpha 2}; \quad \frac{d\Psi_{\alpha 2}}{dt} = \\ &= -a_r \Psi_{\alpha 2} + a_r k_s \Psi_{\alpha 1} - k_3 V \Psi_{\beta 2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d\psi_{\beta 1}}{dt} &= U_{\beta} - a_s \psi_{\beta 1} + a_s k_r \psi_{\beta 2}; \quad \frac{d\psi_{\beta 2}}{dt} = -a_r \psi_{\beta 2} + a_r k_s \psi_{\beta 1} - k_3 V \psi_{\alpha 2}; \\
\frac{dz_{B1}}{dt} &= p_{B1}; \quad \frac{dz_{B2}}{dt} = p_{B2}; \quad \frac{d\varphi_{B1}}{dt} = g_{B1}; \quad \frac{d\varphi_{B2}}{dt} = g_{B2}; \quad \frac{dz_K}{dt} = p_K; \quad \frac{d\varphi_K}{dt} = g_K; \\
\eta_i &= a_1 \sin(\omega t + \delta_i) + a_2 \sin(3\omega t + \delta_i), \quad i = \overline{1,4}; \quad \frac{d\eta_1}{dt} = n_1; \quad \frac{d\eta_2}{dt} = n_2; \quad \frac{d\eta_3}{dt} = n_3; \quad \frac{d\eta_4}{dt} = n_4; \quad (3) \\
\frac{dp_{B1}}{dt} &= \frac{1}{m_B} (\beta_1 (n_1 + n_2) + c_1 (\eta_1 + \eta_2) + \beta_2 (p_K - p_{B1} - l_K g_K) + c_2 (z_K - z_{B1} - l_K \varphi_K) - 2\beta_1 p_{B1} - 2c_1 z_{B1}); \\
\frac{dp_{B2}}{dt} &= \frac{1}{m_B} (\beta_1 (n_3 + n_4) + c_1 (\eta_3 + \eta_4) + \beta_2 (p_K - p_{B2} - l_K g_K) + c_2 (z_K - z_{B2} - l_K \varphi_K) - 2\beta_1 p_{B2} - 2c_1 z_{B2}); \\
\frac{dg_{B1}}{dt} &= \frac{1}{J_{By}} (l_B \beta_1 (n_1 - n_2) + l_B c_1 (\eta_1 - \eta_2) - 2l_B^2 \beta_1 g_{B1} + 2l_B^2 c_1 \varphi_{B1}); \\
\frac{dg_{B2}}{dt} &= \frac{1}{J_{By}} (l_B \beta_1 (n_3 - n_4) + l_B c_1 (\eta_3 - \eta_4) - 2l_B^2 \beta_1 g_{B2} + 2l_B^2 c_1 \varphi_{B2}); \\
\frac{dp_K}{dt} &= \frac{1}{m_K} (\beta_2 (2p_K - p_{B1} - p_{B2}) + c_2 (2z_K - z_{B1} - z_{B2})); \\
\frac{dg_K}{dt} &= \frac{1}{J_{Ky}} ((-\beta_2 l_K (2l_K g_K - p_{B1} - p_{B2})) - c_2 l_K (2l_K \varphi_K - z_{B1} - z_{B2})),
\end{aligned}$$

де S – відстань, що проходить рухомий склад; t – час; $k_1, k_2, k_3, a_s = \frac{1}{\sigma T_s}, k_r = \frac{L_m}{L_r}, a_r = \frac{1}{\sigma T_r}, k_s = \frac{L_m}{L_s}, \sigma = 1 - k_r k_s, T_s = \frac{L_s}{r_1}, T_r = \frac{L_r}{r_2}, L_r, L_s, r_1, r_2$ – сталі коефіцієнти, які враховують параметри еквівалентного двигуна дизель-поїзда; a_0, a_1, a_2 – сталі коефіцієнти, які характеризують момент навантаження; $\psi_{\alpha 1}, \psi_{\beta 1}$ – проекції на осі α та β потокозчеплень статора еквівалентного двигуна поїзда; $\psi_{\alpha 2}, \psi_{\beta 2}$ – проекції на осі α та β потокозчеплень ротора еквівалентного двигуна поїзда; U_{α}, U_{β} – проекції на осі α та β напруги обмоток статора еквівалентного двигуна поїзда; p_{B1}, p_{B2}, p_K – проміжні змінні для похідних коливань підстрибування візків та кузова вагона; g_{B1}, g_{B2}, g_K – проміжні змінні для похідних галопування візків та кузова вагона; η_i ($i = \overline{1,4}$) – нерівності під колісними парами вагона; n_1, n_2, n_3, n_4 – проміжні змінні, що описують похідні нерівності залізничної колії.

Моделювання моделі коливань (3) проводилося у середовищі MATLAB Simulink з використанням чисельного метода Рунге-Кутта із кроком, що обирається автоматично, та за використання реальних параметрів дизель-поїзда ДЕЛ-02.

На рис. 2, 3 наведено результати моделювання вертикальних коливань візків вагона на швидкості 60 км/год. На рис. 4–5 результати моделювання підстрибування та галопування кузова вагона за різної швидкості рухомого складу, а саме на швидкостях 30, 60 та 90 км/год.

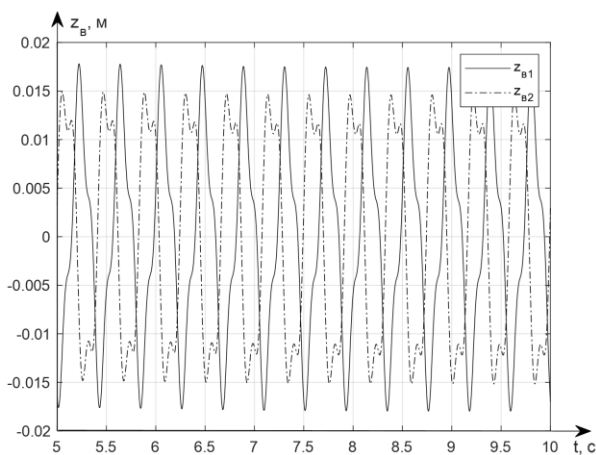


Рис. 2. Графіки підстрибування візків вагона

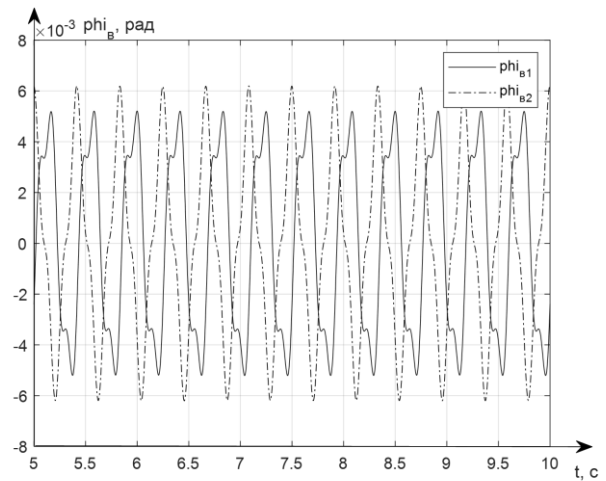


Рис. 3. Графіки галопування візків вагона

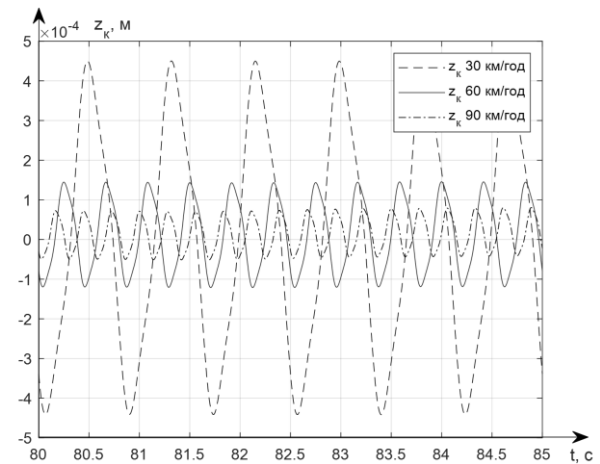


Рис. 4. Графік підстрибування кузова вагона

На рис. 4 видно, що найбільша амплітуда коливань підстрибування спостерігається на швидкості 30 км/год. Зі збільшенням швидкості амплітуда суттєво зменшується, але при цьому частота коливань зростає. Із рис. 5 видно, що за підвищення швидкості руху поїзда амплітуда зміни куту повороту кузова вагона (галопування) також зменшується. При цьому частота коливань зростає і є найбільшою на швидкості 90 км/год. Результати моделювання показали, що амплітуда та частота вертикальних коливань рухомого складу дійсно залежать від швидкості рухомого складу.

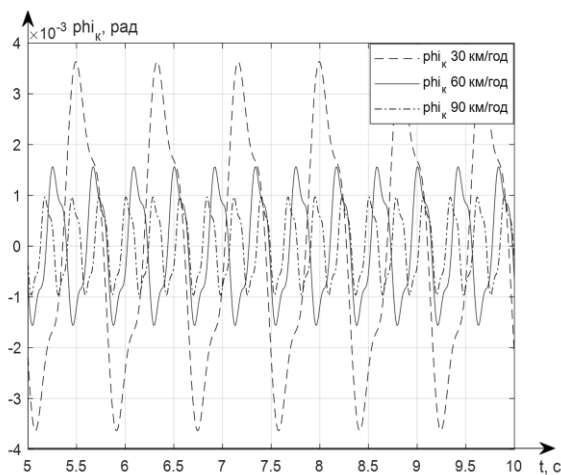


Рис. 5. Графік галопування кузова вагона

Розроблені комплексні математична та імітаційна моделі можуть бути використані для подальшого проведення на ній досліджень коливальних процесів у дизель-поїзді ДЕЛ-02, а також використані у СППР бортових систем керування у поїздах українських залізниць.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Deutsche Welle. Чи зможуть потяги в Україні розганятись до 350 км на годину URL: <https://www.dw.com/uk/chy-zmozhut-potiahy-v-ukraini-rozghaniatys-do-350-km-na-hodynu/a-56373921>
2. Дмитрієнко В. Д., Заковоротний О. Ю., Мезенцев М. В. Проблеми забезпечення високошвидкісного перевезення пасажирів залізничним транспортом України. Інформатика, управління та штучний інтелект, Харків – Краматорськ, 2021. С. 33-34. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/f6165e73-5cc6-4594-9c3b-05cf4d3b9db2>
3. Сокол Э. Н. Сход с рельсов подвижного состава в прямом участке железнодорожного пути // 36. наук.-практ. матеріалів «Перспективи впровадження технічних засобів безпеки руху на залізницях України». – Судак, 2005. С. 41–42
4. Сокол Э. Н. Крушение железнодорожных поездов (Судебная экспертиза). Монография. – К.: Феникс, 2007. – 355 с.
5. Заковоротный А. Ю. Синтез автоматизированной системы управления подвижным составом на основе геометрической теории управления и нейронных сетей: дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.13.07 Нац. техн. ун-т "Харьков. политехн. ин-т". – Харьков, 2017. – 433 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/28330>
6. Заковоротный А.Ю. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Харьков: НТМТ, 2013. – 248 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/45623>
7. Гейко Г. В. Моделі, методи та програмні компоненти бортової комп'ютерної системи дизель-поїзда: дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.05 : НТУ "ХП". – Харків, 2019. – 135 с. – URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/40881>
8. Костриця С. А. Математична модель вагона дизель-поїзда ДПКр-2 / С. А. Костриця, Ю. Г. Соболевська, А. Я. Кузишин, А. В. Батіг // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2018. – № 1 (73). – С. 15–25.
9. Кузишин А. Я. Удосконалення методів визначення основних динамічних показників моторвагонного рухомого складу на стадії проектування: дис. Доктор філософії : спец. 273 Залізничний транспорт : ДНУЗТ, Дніпро, 2019. – 144 с.
10. Garg, Vijay Kumar, and Rao V Dukkipati. Dynamics of Railway Vehicle Systems. New York: Academic Press, 1984.
11. João Pombo, Jorge A.C. Ambrósio, Miguel T. Silva. A new wheel-rail contact model for railway dynamic.Vehicle systems dynamics. – 2007. – P. 31-49.
12. Wang, X., Lu, Z., Wen, J. et al. Kinematics modelling and numerical investigation on the hunting oscillation of wheel–rail nonlinear geometric contact system. Nonlinear Dyn 107, 2075–2097 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11071-021-07103-w>

Received (Надійшла) 05.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.11.2024

Mathematical model of vertical oscillations of rolling stock caused by railway track irregularities

Polina Reshetnikova, Oleksandr Zakovorotnyi

Abstract. During the movement of the train along the railway track, the carriages and their components vibrate, which leads to a decrease in the speed of the rolling stock, wear and tear of its parts, and uncomfortable and potentially dangerous situations for passengers. The paper examines the causes and consequences of rolling stock oscillations. A mathematical model of vertical oscillations (jumping and galloping) of the trolleys and the car body caused by the vertical two-humped unevenness of the track was obtained. The developed complex mathematical and simulation models make it possible to study the dependence of these rolling stock fluctuations on the speed of the rolling stock, the quality of the rails and the indicators of the vibration dampers available in the train, and can also be used in the future in decision support systems (DSS) of on-board control systems in railway transport of Ukraine.

Keywords: mathematical modelling, decision support systems, on-board control systems, rolling stock, oscillatory process, jumping, galloping.

ОСОБЛИВОСТІ КОРПОРАТИВНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Анотація. Розглянуті особливості побудови та використання корпоративних інформаційних систем для оптимізації функціонування організації, покращення процесів виробництва та керування персоналом, а також внутрішньої взаємодії між різними її підрозділами. Визначені основні можливості, що надаються системами даного типу для забезпечення інформаційної безпеки. Описані основні типи підсистем, що можуть створюватися при реалізації систем даного типу та їх функції. Визначені основні переваги таких систем та можливі вразливості, що можуть бути притаманні таким системам через недостатність впроваджених заходів безпеки.

Ключові слова: корпоративна інформаційна система, управління ресурсами, аналіз даних, управління взаємовідносинами з клієнтами, електронний документообіг, керування безпекою.

Вступ

Постановка проблеми. Корпоративна інформаційна система - це вид інформаційної системи, який покращує функції процесів підприємства чи організації шляхом інтеграції. Це, як правило, означає високу якість обслуговування, роботу з великими обсягами даних і здатність підтримувати якусь велику організацію. КІС може використовуватися всіма підрозділами компанії та на всіх її рівнях.

Корпоративні інформаційні системи (КІС) забезпечують технологічну платформу, яка дозволяє організаціям інтегрувати та координувати свої процеси на надійній основі. На сьогодні КІС використовується в поєднанні з системами управління взаємовідносинами з клієнтами і ланцюгами поставок для автоматизації бізнес-процесів. КІС забезпечує єдину систему, яка є центральною для організації, яка забезпечує обмін інформацією на всіх функціональних рівнях та ієрархіях управління.

КІС може бути використана для підвищення продуктивності та скорочення циклів обслуговування, циклів розробки продукту та життєвих циклів. Його можна використовувати для об'єднання існуючих програм задля забезпечення вищого рівня надійності та покращення інформаційної безпеки [1]. В сучасних умовах також слід зазначити необхідність забезпечення безпеки як при організації взаємодії між різними рівнями системи, так і при зберіганні, обробці та передачі інформації [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В рамках сучасних наукових публікацій дослідники частіше за все розглядаються заходи по забезпеченню безпеки корпоративних інформаційних систем, а також їх використання для оптимізації та автоматизації процесів функціонування організацій в різних сферах діяльності.

Частіше за все дослідники розглядаються корпоративні інформаційні системи для використання їх в оптимізації бізнес-процесів великих корпорацій, а також малого та середнього бізнесу. При аналізі даної сфери діяльності були розглянуті роботи за авторством Ali Sunyaev, "The Future of Enterprise Information

Systems" [1], William MacKinnon "Enterprise Information Systems and Strategic Flexibility" [3], David L. Olson, "Enterprise Information System Trends" [4] та Maria Manuela Cruz-Cunha, "Enterprise information systems design, implementation and management: Organizational applications" [5] та їх співавторів.

В роботі "The Future of Enterprise Information Systems" автори розкривають основні особливості систем даного типу та підіймають питання доцільності впровадження децентралізованого підходу до побудови систем даного типу. Також автори визначають основні переваги та можливі ризики від його впровадження.

В роботі "Enterprise Information Systems and Strategic Flexibility" автори визначають можливості, що надаються корпоративними інформаційними системами при забезпеченні стратегічною гнучкістю керуванні процесами організації.

В роботі "Enterprise Information System Trends" автори розглядають сучасні тенденції при створенні корпоративних інформаційних систем, визначають основні напрямки наукових досліджень в даній сфері, а також описують процес управління ризиками з урахуванням особливостей систем даного типу.

В совою чергу робота "Enterprise information systems design, implementation and management: Organizational applications" розглядає загальне використання корпоративних інформаційних систем для оптимізації процесів в організаціях.

Окремо розглядають використання корпоративних інформаційних систем в банківській сфері через підвищені вимоги до безпеки даних та особливостей організації роботи подібних установ. При аналізі даної сфери діяльності були розглянуті роботи за авторством Peggy E. Chaudhry "Enterprise Information Systems Security: A Case Study in the Banking Sector" [6], Mircea Georgescu "The Particularity of the Banking Information System" [7], а також Karolina Pilarezyk "Importance of Management Information System in Banking Sector" [8].

В роботах "Enterprise Information Systems Security: A Case Study in the Banking Sector" та "The Particularity of the Banking Information System" автори

формулюють особливості використання корпоративних інформаційних систем в банківському секторі та пропонують свій підхід до побудови інформаційної безпеки з урахуванням його особливостей.

В свою чергу в роботі "Importance of Management Information System in Banking Sector" автори фокусуються саме на використанні інформаційних систем для організації та оптимізації процесу менеджменту компаній.

Також важливим питанням в даній сфері є забезпечення інформаційної безпеки корпоративних інформаційних систем. Дана тематика розглядається як в розрізі окремих підсистем так і для всієї системи загалом.

При аналізі даної сфери діяльності були розглянуті роботи за авторством Johansson E. "Assessment of Enterprise Information Security; The Importance of Information Search Cost" [9], Merrill Warkentin "Enterprise Information Systems Assurance and System Security: Managerial and Technical Issues" [10], Anirban Sengupta "A Formal Methodology for Detecting Managerial Vulnerabilities and Threats in an Enterprise Information System" [11], Wei She "Security for Enterprise Resource Planning Systems" [12], Olesia Fedoruk "Security and protection of information in electronic document management systems: improving the level of cyber defense" [13], Peggy E. Chaudhry "Enterprise Information Systems Security: A Conceptual Framework" [14], Radoslav Nikolov Hrishev "ERP systems and data security" [15], Jeffry Ventje "Customer Relationship Management and Information Security in the Development of Small and Medium Enterprises in the Era of Digitalization as Strengthening Human Resources" [16], а також Stefan Brands "Secure Access Management: Trends, Drivers and Solutions" [17] та їх співавторів.

В роботі "Assessment of Enterprise Information Security; The Importance of Information Search Cost" автори описують підходи до проведення загального аналізу інформаційної безпеки в корпоративних інформаційних системах, та визначають міжнародну нормативно-правову базу для цього.

В роботі "Enterprise Information Systems Assurance and System Security: Managerial and Technical Issues" автори описують технічні та організаційні виклики, що виникають перед розробниками корпоративних інформаційних систем в результаті розвитку технологій та зміни потреб організацій.

В роботі "A Formal Methodology for Detecting Managerial Vulnerabilities and Threats in an Enterprise Information System" автори фокусуються на виявленні вразливостей в КІС в результаті управлінських недоліків. Також формується структурований підхід для проведення комплексного аналізу управлінської структури організації та виявлення в ній потенційних вразливостей.

Усі інші роботи, що зазначені висше розглядають особливості забезпечення безпеки в окремих підсистемах КІС.

Також важливою темою для дослідження в даній сфері є вивчення потенційних підсистем в рамках корпоративних інформаційних систем. Досліджуючи дане питання були вивчені наукові публікації за

авторством Adnan Mustafa AlBar "Enterprise Resource Planning (ERP) Systems: Emergence, Importance and Challenges" [18], Ellen Monk "Concepts in Enterprise Resource Planning" [19], Essam Shehab "Enterprise resource planning: An integrative review" [20], Adam Idzikowski "Customer Relationship Management (CRM) - Philosophy and its Significance for the Enterprise" [21], Ioan Alexandru Rîpa "Customer relationship management in the international context – theoretical and practical considerations" [22], Andrea Disanferdinand "Human Resource Management" [23], Lee Khuay Guan Lionel "Human Resource Management And Organizational Performance" [24], Mustafa Kamal "Enterprise IT Asset Management" [25], Khaled El-Akruti "A framework for the engineering asset management system" [26], Ikuomola Aderonke Justina "A Secured Cloud-Based Electronic Document Management System" [27].

Основними задачами робіт даної групи є аналіз особливостей конкретних підсистем корпоративних інформаційних систем, визначення принципів їх функціонування та побудови, а також визначення принципів їх застосування для забезпечення функціонування організації.

Мета. Дослідити можливості що задаються корпоративними інформаційними системами для оптимізації процесів, менеджменту та забезпечення безпеки. Визначити основний набір підсистем для систем даного типу та їх загальний вплив на її функціонування. Визначити переваги, що надаються такими системами та потенційні вразливості, що пов'язані з їх використанням.

Виклад основного матеріалу

Корпоративні інформаційні системи поділяються на кілька категорій, кожна з них займає певну нішу в життєвому циклі організації. Вони можуть бути використані як окремо, так і в комплексі, для забезпечення більш широких можливостей. Основні категорії систем описані нижче.

ERP (Enterprise Resource Planning) - Система планування (управління) ресурсами. ERP-системи розробляються навколо спільної, визначеної структури даних (схеми), яка зазвичай має загальну базу даних. ERP-системи надають доступ до корпоративних даних з кількох видів діяльності, використовуючи загальні конструкції та визначення, а також загальний користувацький досвід.

Ключовим принципом ERP є централізований збір даних для широкого розповсюдження. Замість кількох автономних баз даних з нескінченним списком розрізнених електронних таблиць, ERP-системи вносять порядок у хаос, щоб усі користувачі з різними правами доступу та робочими функціями створювали, зберігали та використовували одні й ті самі дані, отримані за допомогою загальних процесів. Завдяки безпечному та централізованому сховищу даних кожен співробітник організації може бути впевнений, що дані є правильними, актуальними та повними. Цілісність даних гарантується для кожного завдання, що виконується в усій організації [18].

Схематичне представлення функціональних областей подано на рис. 1.



Рис. 1. Функціональні області ERP-систем

ERP-система охоплює наступні загальні функціональні області. У багатьох системах даного типу вони називаються і групуються разом як модулі ERP[19, 20]:

- фінансовий облік;
- управлінський облік;
- виробництво;
- обробка замовлень;
- управління ланцюгом поставок;
- управління проектами;
- управління взаємовідносинами з клієнтами;
- сервіси даних.

Під фінансовим обліком розуміємо платежі, включаючи, вимоги до оплати, виконання платежів та стягнення, управління грошима, фінансова консолідація. Під управлінським обліком розуміємо бюджетування, обчислення собівартості та управління витратами. Під обробкою замовлень розуміємо Замовлення на готівку, введення замовлення, перевірка кредитоспроможності, ціноутворення, доступне для обіцяння, запаси, доставка, аналіз і звітність продажів, а також комісійні продажі. Під виробництвом розуміється специфікація матеріалів, планування, управління робочими процесами, контроль якості, виробничий процес, виробничі проекти, виробничий потік, управління життєвим циклом продукції. Під управлінням ланцюгом поставок розуміємо планування ланцюга поставок, планування постачальників, конфігуратор продуктів, закупівля, інвентаризація, обробка претензій, зберігання. Під управлінням проектами розуміємо Планування проекту, планування ресурсів, обчислення вартості проекту, структурна декомпозиція робіт, виставлення рахунків, управління діяльністю. Під управлінням взаємовідносинами з клієнтами розуміємо продажі та маркетинг, комісійні, обслуговування, контакти з клієнтами.

Під сервісами даних розуміємо різноманітні інтерфейси самообслуговування для клієнтів, постачальників та/або співробітників.

Системи управління взаємовідносинами з клієнтами(CRM) використовують для управління та аналізу взаємодії з клієнтами та даних протягом усього життєвого циклу клієнта з метою покращення ділових відносин, сприяння їх утриманню.

Системи CRM збирають дані з різних каналів комунікації, включаючи веб-сайт компанії, телефон (до якого часто входить програмне забезпечення для

IP-телефонії), електронну пошту, чат в реальному часі, маркетингові матеріали, а також з соціальних мереж. Вони дозволяють підприємствам дізнатися більше про свою цільову аудиторію та як краще відповісти їхнім потребам, тим самим зберігаючи клієнтів та забезпечуючи зростання продажів. CRM може використовуватися з минулими, поточними або потенційними клієнтами. Ця повна взаємодія охоплює безпосередній контакт з клієнтами, такі як операції з продажу та обслуговування, прогнозування, аналіз споживчих патернів та поведінки з точки зору компанії. Загальна схема взаємодії з клієнтами в рамках CRM подана на рис. 2 [21, 22].

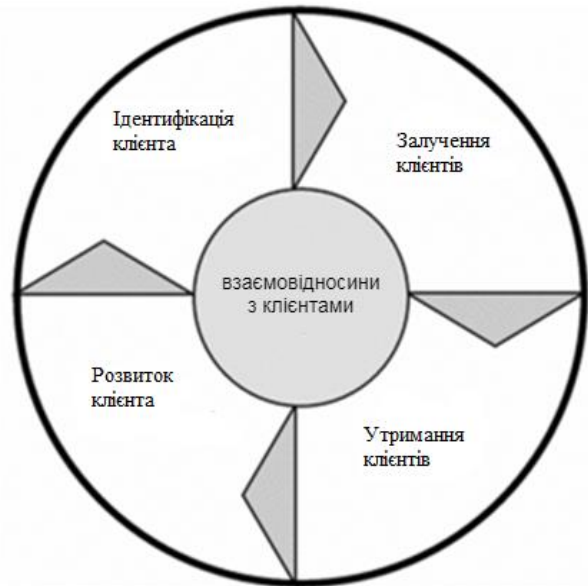


Рис. 2. Схема взаємодії з клієнтами в рамках CRM

Система управління людськими ресурсами(HRM) - це форма програмного забезпечення, яка поєднує в собі ряд систем і процесів для забезпечення легкого управління людськими ресурсами, процесами і даними. Програмне забезпечення для управління персоналом використовується підприємствами для об'єднання ряду необхідних функцій, таких як зберігання даних співробітників, управління нарахуванням заробітної плати, підбір персоналу, адміністрування пільг, обліку робочого часу та відвідуваності, управління ефективністю співробітників, а також відстеження записів про компетенції та навчання [23]. Система HRM є найуразливішою з погляду захисту персональних даних

Система управління людськими ресурсами забезпечують [24]:

- ведення кадрового обліку;
- звітність і аналіз даних про працівників;
- робочий графік та облік відвідування;
- оцінка продуктивності праці;
- виплату пільг та компенсацій;
- рекрутинг та адаптацію персоналу;
- планування управління кадрами;
- формування кадрових резервів;
- відстежування претендентів та їх резюме.

Схематичне представлення системи управління людськими ресурсами подано на рис. 3 [24].



Рис. 3. Система управління людськими ресурсами

Система управління активами організації (EAM) – система управління життєвим циклом фізичних активів організації. Вона охоплює такі теми, як проектування, будівництво, введення в експлуатацію, експлуатація, технічне обслуговування та виведення з експлуатації або заміна установок, обладнання та споруд. Активами можуть бути або нерухомість, така як будівлі, заводи, виробниче обладнання, або рухомі активи, такі як транспортні засоби, кораблі, рухоме обладнання тощо. Управління життєвим циклом цінних фізичних активів вимагає регресивного планування та виконання роботи [25, 26]. Схематичне представлення задач системи управління активами підприємства подано на рис. 4 [27].

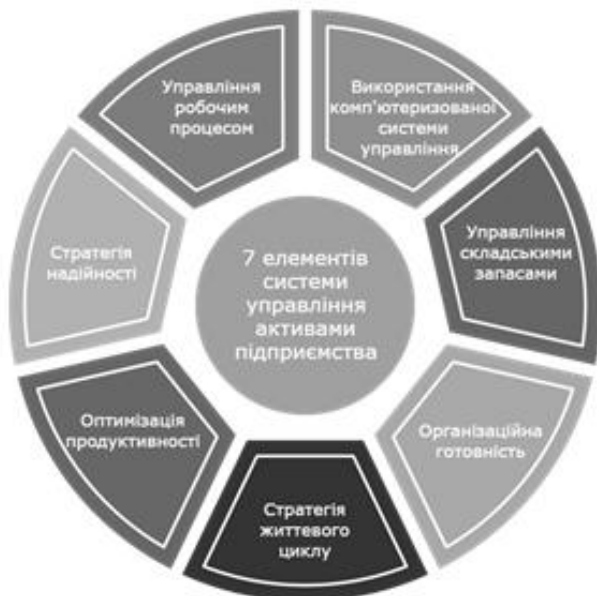


Рис. 4. Задачі системи управління активами підприємства

Головною метою EAM-систем є забезпечення такого режиму експлуатації основних виробничих фондів, який забезпечував би максимальну пропускну здатність виробництва за рахунок підтримки необхідного коефіцієнта технічної готовності при допустимому рівні витрат на обслуговування і ремонт основних фондів підприємства.

Система електронного документообігу (EDMS) – це програмне рішення, яке забезпечує централізовану платформу для управління, організації та зберігання електронних документів і файлів. EDMS дозволяє організаціям оптимізувати процеси керування документами, покращити співпрацю та підвищити безпеку та доступність своїх цифрових документів. EDMS зазвичай включає такі функції, як сканування документів, індексування, контроль версій, контроль доступу та функція пошуку. Ці функції дозволяють організаціям цифровізувати робочі процеси з документами та автоматизувати багато ручних завдань для керування паперовими документами[28].

Одна з переваг використання EDMS полягає в тому, що вона може підвищити безпеку та доступність цифрових документів. EDMS надає функції контролю доступу, які дозволяють організаціям контролювати, хто може отримувати доступ до своїх цифрових документів і змінювати їх. EDMS також надає функції контролю версій, які дозволяють організаціям відстежувати зміни документів у часі, забезпечуючи контрольний журнал змін і переглядів документів[29,30]. Схематичне представлення даної системи подано на рис. 5 [30].

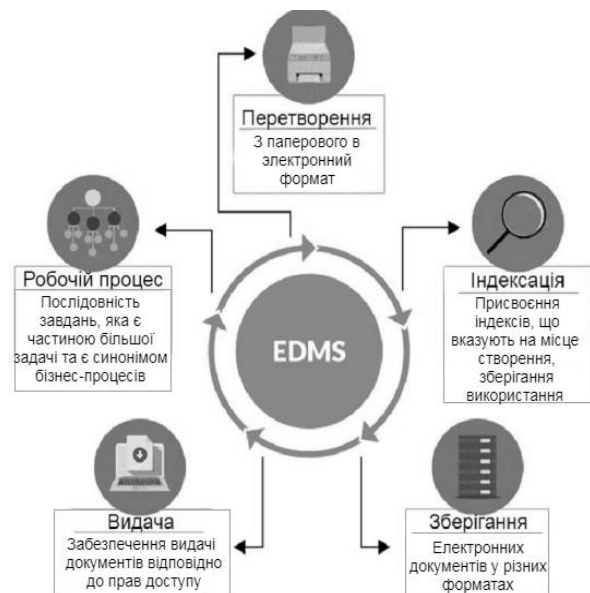


Рис. 5. Задачі системи електронного документообігу

Також в певних наукових роботах окремо виділяють систему забезпечення інформаційної безпеки. Дана підсистема включає в себе процеси збору та обробки інформації про інциденти безпеки, що виникають в інших підсистемах КІС, можливості по автоматизованому або керованому адміністратором системи реагуванню на ці інциденти, тощо. Також під функціонал даної підсистеми підпадає керування доступом до ресурсів КІС, визначення та керування політикою паролів, забезпечення заходів безпеки, що визначені політикою безпеки компанії, в процесі передачі, обробки на зберігання інформації. Схема забезпечення безпеки КІС подана на рис. 6.

Важливим фактором при організації підсистеми даного типу є питання централізації або децентралізації керування безпекою.

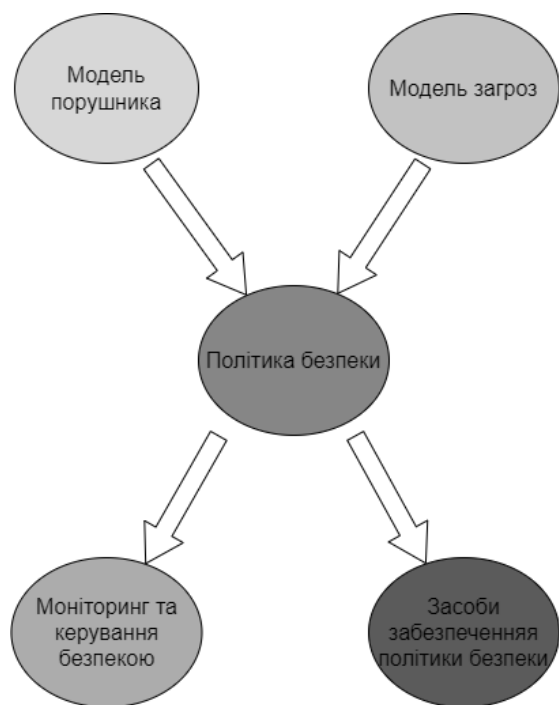


Рис. 6. Схема забезпечення безпеки КІС

Децентралізоване керування безпекою полягає в створенні окремих безпекових заходів в рамках кожної з підсистем КІС. До переваг подібного принципу побудови слід віднести [2, 9-13]:

- політики та рішення узгоджуються з конкретною моделлю та потребами в рамках кожної з підсистем;
- більша швидкість прийняття рішень та автономізація операцій безпеки;
- ширші можливості по налаштуванню політик безпеки.

В свою ж чергу централізований підхід до керування безпекою полягає в створенні загальної системи безпеки, що буде здирати, та оброблювати дані з різних підсистем та встановлювати загальні заходи безпеки, що будуть діяти в рамках всієї організації.

Також слід зазначити, що деякі великі корпорації використовують комбінацію централізованої та децентралізованої моделі. Вона полягає в тому, що

створюються централізовані системи керування безпекою для кожного з регіонів (області, країни тощо) які забезпечують заходи безпеки в межах даного регіону та передають звіти в центральний офіс для аналізу інцидентів безпеки та створення регіональних або загальних рекомендацій по забезпеченню безпеки [31, 32].

Висновки

Виходячи з досліджених наукових публікацій в рамках корпоративних інформаційних систем рекомендується використовувати саме централізовану модель побудови системи забезпечення безпеки через її потенційно більший рівень захищеності, порівняно з децентралізованою, зменшення ризиків неузгодженості політик безпеки в різних підрозділах організації.

Всі описані висше системи дозволяють розподілити задачі в рамках підприємства, розробити та впровадити відповідні програмні, апаратні та організаційні заходи безпеки для кожної з областей діяльності. Системи управління активами та документацією дозволяють оптимізувати облік інцидентів безпеки. На основі звітів про інциденти буде можливо провести аналіз та виявити недоліки системи.

Слід також зазначити, що у разі того, якщо заходи безпеки, що реалізовані в рамках корпоративної інформаційної системи будуть недостатніми, то це може призвести до витоку персональних даних користувачів, працівників компанії, корпоративної інформації, порушення функціонування системи або її підсистем, пошкодження або відмови засобів виробництва та іншим інцидентам безпеки.

КІС надають широкий спектр можливостей по оптимізації процесу виробництва, управління персоналом та активами та впровадженням заходів безпеки. Але через збільшення об'єму даних що зберігаються та кількості обслуговуючого персоналу, який може отримати доступ до даних в рамках системи підвищується ризик витоку інформації. Через це такий тип систем також потребує комплексної системи безпеки що буде охоплювати всі сфері діяльності підприємства, системи виявлення інцидентів та заходи з її запобігання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sunyaev F., Dehling T., Strahinger S. & al. The Future of Enterprise Information Systems. *Business & Information Systems Engineering*. 65, 2023. Pp. 731-751. DOI: 10.1007/s12599-023-00839-2
2. Pevnev, V., Tsuranov, M., Zemlianko, H., Amelina, O. Conceptual Model of Information Security. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham. 2021. Vol 188. P. 158-168. DOI: 10.1007/978-3-030-66717-7_14
3. W. MacKinnon, G. Grant and D. Cray, Enterprise Information Systems and Strategic Flexibility, Proceedings of the 41st Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2008), Waikoloa, HI, USA, 2008, pp. 402-402, DOI: 10.1109/HICSS.2008.149
4. David L. Olson, Subodh Kesharwani. Enterprise Information System Trends. *Enterprise Information Systems*. Berlin, Heidelberg, 2011. Pp 3-14. DOI: 10.1007/978-3-642-19802-1_1
5. Cruz-Cunha M. M. Enterprise information systems design, implementation and management: Organizational applications. Maria Manuela Cruz-Cunha. – Hershey, PA : Business Science Reference, 2011. 586 p.
6. Peggy E. Chaudhry & al. Enterprise Information Systems Security: A Case Study in the Banking Sector. *Lecture Notes in Business Information Processing*. Berlin, Heidelberg, 2013. Pp. 206-214. DOI: 10.1007/978-3-642-36611-6_18
7. Georgescu M., Jeflea V. The Particularity of the Banking Information System. *Procedia Economics and Finance* 20. 2015 Pp. 268-276. DOI: 10.1016/s2212-5671(15)00074-x
8. Pilarczyk K. Importance of Management Information System in Banking Sector. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, sectio H, Oeconomia* 50. 2016, № 2. Pp. 69. DOI: 10.17951/h.2016.50.2.69

9. E. Johansson, M. Ekstedt, P. Assessment of Enterprise Information Security. The Importance of Information Search Cost. Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'06), Kauia, HI, USA, 4–7 січ. 2006 p. 2006. DOI: 10.1109/hicss.2006.67
10. Warkentin M. Enterprise Information Systems Assurance and System Security: Managerial and Technical Issues: IGI Global, 2006. – 406 с.
11. Anirban Sengupta, Chandan Mazumdar, Aditya Bagchi. A Formal Methodology for Detecting Managerial Vulnerabilities and Threats in an Enterprise Information System. *Journal of Network and Systems Management* 19, № 3, 2010. Pp. 319–342. DOI: 10.1007/s10922-010-9180-y
12. Wei She, Bhavani Thuraisingham. Security for Enterprise Resource Planning Systems. *Information Systems Security* 16, № 3, 2007. Pp.152–163. DOI: doi.org/10.1080/10658980701401959
13. Fedoruk O. Security and protection of information in electronic document management systems: improving the level of cyber defense. *Вісник Книжкової палати* № 4, 2024. Pp. 39–44. DOI: doi.org/10.36273/2076-9555.2024.4(333).39-44
14. Peggy E. Chaudhry & al. Enterprise Information Systems Security: A Conceptual Framework. Re-conceptualizing Enterprise Information Systems. Berlin, Heidelberg, 2012. Pp. 118–128. DOI: 10.1007/978-3-642-28827-2_9
15. Hrishev R. ERP systems and data security. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 878, 2020. Pp. – 012009. DOI: 1088/1757-899x/878/1/012009
16. Ventje Jeffry Kuhuparuw, Elyta ., Syarif Redha Fachmi Al Qadrie. Customer Relationship Management And Information Security In The Development Of Small And Medium Enterprises In The Era Of Digitalization As Strengthening Human Resources. *International Journal of Multidisciplinary Research & Reviews* 3, № 1, 2024. Pp. 39–58 DOI: 10.56815/ijmrr.v3.i1.2024/39-58
17. Secure Access Management: Trends, Drivers and Solutions Information Security Technical Report 7, № 3, 2002. Pp. 81–94. DOI: doi.org/10.1016/s1363-4127(02)00309-6
18. Adnan Mustafa AlBar, Mashael A. Hddas, Md Rakibul Hoque. Enterprise Resource Planning (ERP) Systems: Emergence, Importance and Challenges. *The International Technology Management Review* 4, № 4, 2014. Pp. 170. DOI: 10.2991/itmtr.2014.4.4.1
19. Ellen Monk, Bret Wagner. *Concepts in Enterprise Resource Planning Technology*, 2012. 272 p.
20. E. M. Shehab & al. Enterprise resource planning. *Business Process Management Journal* 10, № 4, 2004. Pp. 359–386. DOI: 1108/14637150410548056
21. Adam Idzikowski & al. Customer Relationship Management (CRM) - Philosophy and its Significance for the Enterprise. *System Safety: Human - Technical Facility – Environment* 1, № 1, 2019. Pp. 1004–1011. DOI: 10.2478/czoto-2019-0127
22. Rîpa I. A. Customer relationship management in the international context – theoretical and practical considerations. Proceedings of the International Conference on Business Excellence 16, № 1, 2022. Pp. 1060–1072. DOI: 10.2478/picbe-2022-0098
23. Disanferdinand A. Human Resource Management. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)* 8, № 9, 2018. DOI: 10.29322/ijsrp.8.9.2018.p8126
24. Lee Khuay Guan Lionel, Sukhumpong Channuwong, Kulpornpath Wongmajarapinya. Human resource management and organizational performance. *Int. Journal of Advanced Research* 11, № 05, 2023. Pp. 872–881. DOI: 10.21474/ijar01/16940
25. HRM functions slide template with circle diagram - Dreamstime [Електронний ресурс] // Dreamstime. – Режим доступу: <https://www.dreamstime.com/vector-slide-template-circle-diagram-human-resources-management-hrm-functions-diagram-scheme-planning-recruitment-image132671587>
26. Mustafa Kamal, Russell Petree. Enterprise IT Asset Management. *Review of Business Information Systems (RBIS)* 10, № 3, 2006. Pp. 47–52. DOI: 10.19030/rbis.v10i3.5337
27. Khaled El-Akruti, Richard Dwight. A framework for the engineering asset management system. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 19, № 4, 2013. Pp. 398–412. DOI: 10.1108/jqme-01-2012-0002
28. Enterprise Asset Management [Електронний ресурс] // ABS Group. – Режим доступу: <https://www.abs-group.com/Solutions/Asset-Management/Enterprise-Asset-Management/>
29. Ikuomola Aderonke Justina, Oyekan, Ezekiel Abiodun, Orogbemi, Olutomisin M. Secured Cloud-Based Electronic Document Management System. *International Journal of Innovative Research and Development*, 2022. DOI: 10.24940/ijird/2022/v11/i12/dec22010;
30. Document Management System [Електронний ресурс] // indiamart.com. – Режим доступу: <https://www.indiamart.com/proddetail/document-management-system-15507440897.html>
31. Pevnev, V., Frolov, A., Tsuranov, M., & Zemlianko, H. Ensuring the Data Integrity in Infocommunication Systems. *International Journal of Computing*. 2022. Vol. 21(2), P. 228-233. DOI: 10.47839/ijc.21.2.2591;
32. Serkov, A., Kasilov, O., Lazurenko, B., Pevnev, V., Trubchaninova, K. *Strategy of Building a Wireless Mobile Communication System in the Conditions of Electronic Counteraction*. *Radioelectronic and Computer Systems*, no. 2, pp. 160–170, 2023 DOI: 10.32620/reks.2023.2.13.

Received (Надійшла) 19.06.2024

(Accepted for publication) Прийнята до друку 30.10.2024

Features of enterprise information systems

S. Butenko

Abstract. The features of constructing and using corporate information systems for optimizing the functioning of an organization, improving production processes, and managing personnel, as well as internal interaction between its various departments, are considered. The main capabilities provided by such systems to ensure information security are identified. The main types of subsystems that can be created when implementing such systems and their functions are described. The main advantages of such systems and possible vulnerabilities that may be inherent in such systems due to insufficiently implemented security measures are identified.

Keywords: enterprise information system, resource management, data analysis, customer relationship management, electronic document management, security management.

Svitlana Gavrylenko, Vadim Poltoratskyi

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

NETWORK INTRUSION DETECTION MODEL BASED ON CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS AND TABULAR DATA CONVERTED INTO IMAGES

Abstract. The **object of the study** is the process of identifying the state of a computer systems and network. The **subject** of the study are the methods of identifying the state of computer systems and networks. The **purpose** of this paper is to improve the quality of detecting intrusions into computer networks. The UNSW-NB 15 set, which contains information about the normal functioning of the network and during synthetic intrusions, was used as input. Deep neural networks (DL), their advantages and problems in big data processing are considered. It was found that deep neural networks when processing tabular data require their transformation. Modern methods of tabular data transformation were studied. **The results obtained.** A method of converting tabular data into an image is proposed. The method converts each object of a separate class from a set of tabular data into an image by mapping the attribute values onto a two-dimensional plane. The method was implemented programmatically using the GOOGLE COLAB cloud service based on Jupyter Notebook. **Conclusions.** It was found that the use of the proposed conversion method of tabular data into an image made it possible to use a classification model based on the CNN neural network and increase the quality of detection of intrusions into computer networks up to 4%.

Keywords: intrusion detection systems, computer networks, machine learning, deep neural networks, tabular data conversion.

Introduction

Despite significant progress in the field of cyber security, today there is a need for continuous improvement of methods and technologies used to monitor and identify intrusions into computer networks [1].

Network traffic represents a complex set of data transmitted across a network. Its characteristics are determined by the interaction of numerous factors, including the properties of devices, software, the data itself, and the network. This forms the key features that characterize the traffic.

- **Hardware components:** The device type, technical specifications (processor, RAM), operating system, and network adapters significantly impact the nature of the generated traffic.

- **Software:** The use of different applications, their functionality, versions, and interaction protocols shape the characteristics of the traffic.

- **Data:** The type of data (text, images, video), its volume, and transmission frequency directly affect the network load.

- **Network infrastructure:** Bandwidth of channels, transmission delays, quality of service, and network topology determine the data transmission capabilities.

The set of features characterizing network traffic is flexible and can be adapted to specific analysis tasks. For example, when studying cyber threats, attributes related to attacks, such as type, source, and target are added to the traditional set of features. This approach allows for the creation of a detailed traffic profile but also increases its dimensionality. A large number of features complicates the process of training machine learning models, as it requires more computational resources and time. The presence of high-dimensional data introduces the problem of computational complexity, which can make training machine learning models slower and more expensive.

Today, models based on deep neural networks are the most popular for big data processing [2–4]. Neural networks are typically associated with image and text processing. However, they can also be successfully applied to tabular data, though this requires transforming the data first [5].

The purpose of this work is to develop a method of transforming tabular data into images and using deep neural networks to improve the quality of intrusion detection in computer networks.

1. Approaches and methods

Deep neural networks (DL) have a unique ability to autonomously discover and learn hidden patterns in data, forming internal representations of information. This feature makes them a powerful tool for solving complex problems such as image recognition, natural language processing, and speech signal analysis. Their ability to automatically identify abstract representations allows deep learning models to effectively adapt to new tasks and generalize acquired knowledge to new data. In many tasks, especially with large amounts of data, neural networks demonstrate higher accuracy compared to traditional machine learning methods like linear regression or decision trees. Additionally, deep neural networks can detect complex nonlinear relationships between data features, which is particularly useful for tabular data with many interactions between variables.

Due to these properties of deep neural networks, numerous attempts have been made to apply them to various types of tabular data [6].

Converting raw data into images is one of approach to applying DL to tabular data [7].

For example, Taehoon Kim et al. in his work [8] uses dimensionality reduction algorithms such as t-SNE, UMAP, PCA, and others to convert tabular data into grayscale images, which are then combined into a color image.

Sharma A. et al. [9] also proposes a method called DeepInsight, which involves arranging similar or

correlated features in neighboring areas of a two-dimensional feature map to facilitate learning their complex relationships and interactions. This method also involves using t-SNE or kPCA. The authors also note that the resolution of the image is significant; a lower resolution means that more features will overlap, which can lead to information loss.

Bazgir O. et al. [10] proposed a method called Representation of Features as Images with Neighborhood Dependencies (REFINED), which transforms tabular data into images using Bayesian Multidimensional Scaling (BMDS) and a hill climbing algorithm.

Finally, Zhu et al. [11] introduced a technique for converting tabular data into images called the "Image Generator for Tabular Data" (IGTD). This technique assigns one pixel in a grayscale image to each feature, positioning similar objects closer together. Research has shown that models based on recurrent neural networks and CNNs trained on images generated by IGTD perform are better than CNN models trained on images from other converters. However, the quality of such models still requires improvement, particularly in the context of multiclass classification.

2. Method development

In this work, the UNSW-NB15 dataset is used as the source data. This dataset was developed by the Cyber Range laboratory of the Australian Centre for Cyber Security (ACCS) and contains information on normal network operations as well as synthetic intrusions [12].

UNSW-NB15 represents nine main attack categories using the IXIA tool: PerfectStorm Analysis, Backdoors, DoS, Exploits, Fuzzers, Generic, Reconnaissance, Shellcode, and Worms. There are 45 features developed using the Argus and Bro-IDS tools, as well as twelve algorithms, which cover network packet characteristics.

The model was implemented programmatically using the GOOGLE COLAB cloud service based on Jupyter Notebook.

As part of the study, the following stages of data pre-processing were performed:

- Data cleaning. Removal of erroneous or invalid data such as empty values, invalid records.
- Removal of non-informative features (for example, id).
- Data balancing.
- Data Scaling. So that all features have the same range of values.

To simplify modeling for multiclass classification, four of the ten classes were selected based on the largest number of objects: Normal, Generic, Exploits, and Fuzzers.

Data analysis revealed that the data was imbalanced. To simplify modeling and reduce training time, the RandomUnderSampler algorithm [13, 14] was applied to remove excess objects.

To convert tabular data of an object into an image, the following algorithm was proposed:

1. Store the target features in a separate set.
2. Convert categorical data to numerical values using the "factorize()" method.

3. Normalize the data using the "MinMaxScaler()" method.

4. Iterate through each row and transpose it so that feature names become indices. This is necessary to position features along the x-axis and their values along the y-axis.

5. Generate a plot, convert it to a grayscale image, and save it in .png format.

Using the developed algorithm, all objects in the dataset were converted into image format. The images are created as two-dimensional line plots, where the x-axis represents the features and the y-axis displays their values (Fig. 1).

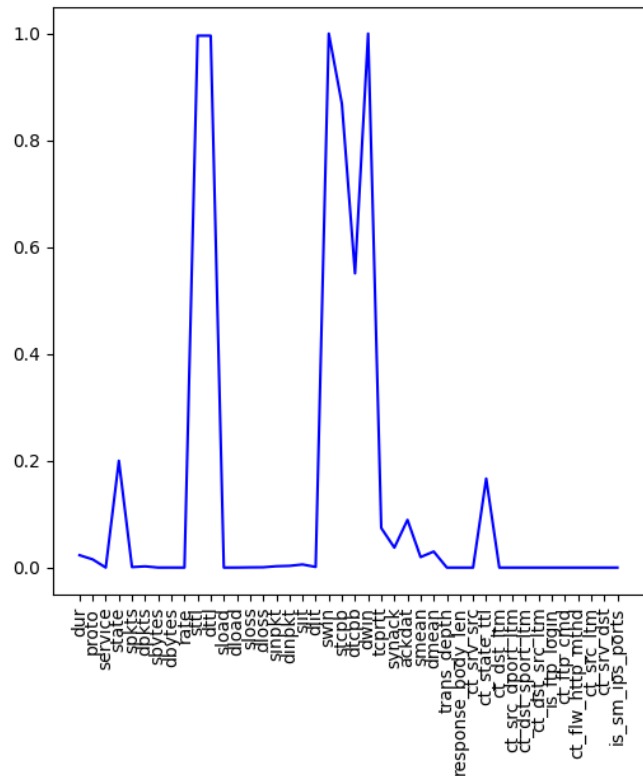


Fig. 1. An object of the Normal class with the standard set of features

Preserving the number of features eliminates the risk of information loss, thereby increasing the model's effectiveness. Moreover, converting data into images removes the need for a preprocessing step such as feature selection. Regardless of the number of features depicted in the image, the final volume of data fed into the model remains unchanged.

The next step in building the model is to create training and testing datasets for the classification model, which include these objects.

The following algorithm is proposed:

1. In a loop, load the current object's image using the `load_img()` method, convert it to a three-dimensional array using the `img_to_array()` method, and then add it to the list.

2. Serialize the list for storage. Serialization is needed for convenient storage of the dataset and quick loading.

3. Convert the list into a NumPy array, resulting in a four-dimensional array that can be fed into the neural network.

4. Also, load the class labels that were previously saved in a separate dataset.

5. Split the data into training and testing datasets.

The combination of the two previously developed algorithms forms a method for transforming tabular data

into images, which are then used as input data for the model.

Since the IGTD method for converting tabular data into images showed the best results in previous studies, we will compare its results with those of the proposed method.

Fig. 2 shows an object of the Normal class transformed into an image using the IGTD method.

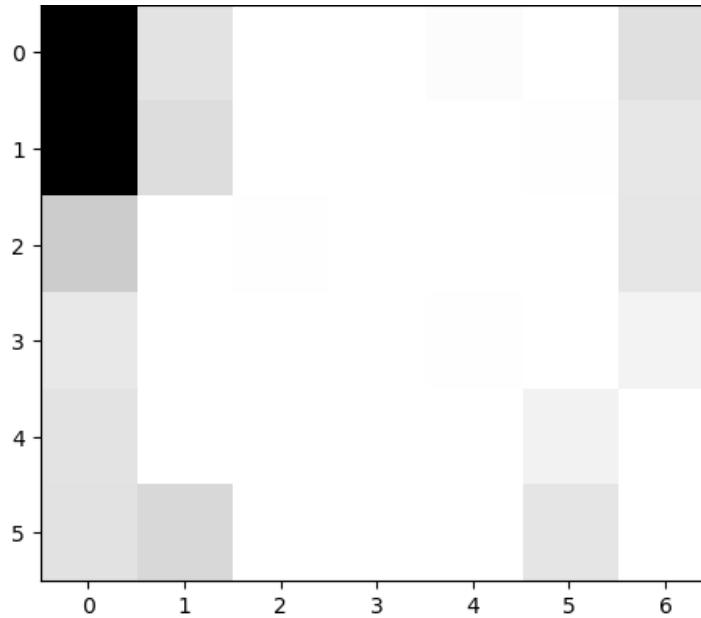


Fig. 2. An object of the Normal class transformed into an image using the IGTD method

For comparative analysis, a Convolutional Neural Network (CNN) model was constructed. The UNSW-NB15 dataset, which was converted from tabular data into images, was used as the input data. The model's

performance was assessed using metrics such as Accuracy, F-1 Score, Precision, Recall, Training Time, and Recognition Time. The test results are presented in Table 1.

Table 1 – Results of multiclass classification of the dataset converted into images using the IGTD method and the proposed method

Transformation method	Model of classifier	Accuracy, %	F1-score, %	Precision, %	Recall, %	Training time, s	Recognition time, s
IGTD	CNN	83.21	83.35	84.9	81.66	680.2	10.45
Proposed method	CNN	86.89	87.06	88.02	85.59	669.3	10.62

As shown in Table 2, using the proposed method for converting tabular data into images enabled the construction of a classification model based on a CNN and improved classification quality by up to 4%.

Conclusions

This work investigates the effectiveness of using modern deep neural network models for intrusion detection in computer networks.

Deep neural networks are among the most popular methods for analyzing big data. Typically, neural network models are used for processing images and texts. For handling tabular data, these models require a transformation of the input data.

The research analyzed various data conversion approaches. It was found that the most effective technique for converting tabular data into images is the

"Image Generator for Tabular Data" (IGTD). However, the quality of the model remains insufficient.

To improve model quality, a method for converting tabular data into images has been proposed. Initially, images are created for each object in the form of two-dimensional line plots, where features are represented on the x-axis and their values on the y-axis. The images are then converted into a three-dimensional array, and a list of objects is formed. This list is converted into a NumPy array, resulting in a four-dimensional array that can be fed into the neural network.

The proposed method was implemented using the GOOGLE COLAB cloud service based on Jupyter Notebook. An intrusion detection model for computer networks based on a Convolutional Neural Network (CNN) was developed. The model also includes a block for converting the input data into images.

In this work, the UNSW-NB15 dataset is used as the source data. This dataset was developed by the Cyber Range laboratory of the Australian Centre for Cyber Security (ACCS) and contains information about normal network operations as well as synthetic intrusions.

For comparative analysis, the input data was converted into images using both the proposed method and the IGTD method.

Using the proposed method for converting tabular data into images enabled the application of a CNN-based classification model and improved classification quality by up to 4%.

Future research will focus on augmenting the input data with synthetic features and evaluating their impact on model performance.

REFERENCES

1. Chen, Ying. "Big data technology for computer intrusion detection" *Open Computer Science*, vol. 13, no. 1, 2023, 20220267. <https://doi.org/10.1515/comp-2022-0267>
2. Gavrylenko, S., Poltoratskyi, V., & Nechyporenko, A. "Intrusion detection model based on improved transformer". *Advanced Information Systems*, 2024, 8(1), 94–99. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.1.12>
3. Dusan Nedeljkovic, Zivana Jakovljevic. "CNN based method for the development of cyber-attacks detection algorithms in industrial control systems" , *Computers & Security*, 2022, vol.114, 102585, <https://doi.org/10.1016/j.cose.2021.102585>
4. A. El-Rady, H. Osama, R. Sadik and H. El Badwy, "Network Intrusion Detection CNN Model for Realistic Network Attacks Based on Network Traffic Classification," 2023 40th National Radio Science Conference (NRSC), Giza, Egypt, 2023, pp. 167-178, <https://doi.org/10.1109/NRSC58893.2023.10152872>
5. S. Golubev and E. Novikova, "Transformation of Network Flow Data into Images for Intrusion Detection Using Convolutional Neural Networks," 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 948-952, <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272890>
6. Borisov V, Leemann T, Seßler K, Haug J, Pawelczyk M, Kasneci G. "Deep neural networks and tabular data: A survey." *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2022 <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2022.3229161>
7. Medeiros Neto L, Rogerio da Silva Neto S, Endo PT, "A comparative analysis of converters of tabular data into image for Kim the classification of Arboviruses using Convolutional Neural Networks." *PLoS ONE* 2023? 18(12): e0295598. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295598>
8. Taehoon & Pak, Wooguil. (2023). "Deep Learning-Based Network Intrusion Detection Using Multiple Image Transformers." *Applied Sciences*. 13. 2754. <https://doi.org/10.3390/app13052754>
9. Sharma, A., Vans, E., Shigemizu, D. et al. "DeepInsight: A methodology to transform a non-image data to an image for convolution neural network architecture". *Sci Rep* 9, 11399 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47765-6>
10. Bazgir O, Zhang R, Dhruva SR, Rahman R, Ghosh S, Pal R. "Representation of features as images with neighborhood dependencies for compatibility with convolutional neural networks." *Nature communications*. 2020;11(1):4391. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18197-y>
11. Zhu Y, Brettin T, Xia F, Partin A, Shukla M, Yoo H, Evrard YA, Doroshov JH, Stevens RL. "Converting tabular data into images for deep learning with convolutional neural networks." *Sci Rep*. 2021 Jul 1;11(1):14036. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93376-5>
12. N. Moustafa and J. Slay, "UNSW-NB15: a comprehensive data set for network intrusion detection systems (UNSW-NB15 network data set)," 2015 Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS), Canberra, ACT, Australia, 2015, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/MilCIS.2015.7348942>
13. Abdi L, Sattar H. "To combat multi-class imbalanced problems by means of over-sampling techniques". *IEEE Trans Knowl Data Eng*. 2016;28(1):238–251. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2015.2458858>
14. S. Gavrylenko, V. Zozulia, and N. Khatsko. "Methods for Improving the Quality of Classification on Imbalanced Data", Proceedings of the IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2023, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312879>

Received (Надійшла) 15.07.2024

(Accepted for publication) Прийнята до друку 23.10.2024

Модель виявлення вторгнень у комп'ютерну мережу на основі згорткових нейронних мереж та табличних даних, перетворених на зображення

С. Ю. Гавриленко, В. О. Полторацький

Анотація. Об'єктом дослідження є процес ідентифікації стану комп'ютерної системи та мережі. Предметом дослідження є методи ідентифікації стану комп'ютерних систем і мереж. Метою даної роботи є підвищення якості виявлення вторгнень в комп'ютерні мережі. В якості вхідних даних використовувався набір UNSW-NB 15, який містить інформацію про нормальне функціонування мережі та під час синтетичних вторгнень. Розглянуто глибокі нейронні мережі (DL), їх переваги та проблеми в обробці великих даних. Виявлено, що глибокі нейронні мережі при обробці табличних даних потребують їх трансформації. Досліджено сучасні методи трансформації табличних даних. **Отримано такі результати.** Запропоновано метод перетворення табличних даних в зображення. Метод перетворює кожен об'єкт окремого класу з набору табличних даних на зображення шляхом відображення значень атрибутів на двовимірну площину. Метод реалізовано програмно за допомогою хмарного сервісу GOOGLE COLAB на базі Jupyter Notebook. **Висновки.** Встановлено, що використання запропонованого методу перетворення табличних даних в зображення дозволило використати модель класифікації на основі нейронної мережі CNN та підвищити якість виявлення вторгнень у комп'ютерні мережі до 4%.

Ключові слова: системи виявлення вторгнень, комп'ютерні мережі, машинне навчання, глибокі нейронні мережі, перетворення табличних даних.

О. А. Дмитренко, М. А. Скулиш

Національний технічний університет України "КПІ ім. Ігоря Сікорського", Київ, Україна

МЕТОДИ ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ АЛГОРИТМУ ДОПОВНЮВАЛЬНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Анотація: У статті розглядається проблема ефективного використання ресурсів у хмарних обчислювальних середовищах, що стає дедалі актуальнішою через зростання попиту на обчислювальні потужності. Представлений алгоритм оптимізації розподілу навантаження створеного мікросервісами та монолітами на серверні вузли, спрямований на максимізацію використання доступних ресурсів. Стаття зосереджена на описанні технологій, які допоможуть повторити алгоритм локально з метою його тестування для власних потреб. Порівнюються методи збору метрик, а також середовища, у яких можна впровадити цей алгоритм. Особливу увагу приділено Kubernetes і можливості застосування різних механізмів розподілу мікросервісів, таких як Node Affinity, Pod Affinity/Anti-Affinity, а також власні планувальники (Custom Schedulers). Для проактивного масштабування включаючи "гарячий розігрів" вузлів запропоновано використання Horizontal Pod Autoscaler з використанням метрик роботи елементів системи.

Ключові слова: Kubernetes, збір метрик, доповняльні навантаження, хмарні системи, мікросервісна архітектура, моноліти.

Вступ

Сучасне ІТ рухається у напрямку забезпечення сервісів в будь-який час довольній кількості людей. Часто одне програмне забезпечення необхідне людям в різних куточках світу, наприклад, сайт покупки авіабілетів. Це накладає додаткові вимоги на програмне забезпечення, а саме змушує його бути готовим до різких навантажень коли-завгодно. Це говорить про необхідність програмного забезпечення масштабуватись (scaling) та рівномірно розподіляти навантаження (load balancing). З такою метою створювались хмарні системи, а трохи згодом з'явився Kubernetes [1], котрий теж має такі можливості.

Авторами статті пропонується алгоритм [2], який влаштується у стандартні добре відтестовані процеси хмарної системи та допоможе ресурсоефективно розподілити навантаження додатків, щоб використовувалось менше серверів для забезпечення тої самої продуктивності шляхом розташування доповняльних навантажень разом.

Постановка проблеми. Запропонувати способи реалізації методу пошуку доповняльних мікросервісів локально з метою реалізації та тестування алгоритму доповняльних додатків (мікросервісів) та потенційного його використання для свого проєкту, розгорнутого на хмарній системі чи іншому сервер провайдері.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Коли мова йде про алгоритм, котрий має виконуватись на хмарному середовищі, та ще й самим оператором, слід мати ресурси для імітації процесу на локальних серверах, аби його протестувати та налаштувати параметри. По суті єдиним інструментом, який може зімітувати хмарну систему є Kubernetes. Це платформа з відкритим вихідним кодом для управління контейнеризованими (через Docker [3]) робочими навантаженнями та супутніми службами (наприклад, трекінг метрик). Вона характеризується кросплатформенністю та розширюваністю, тобто в разі посиленого навантаження, вона може адаптуватись та вирости, аби якісно надати послугу користувачам. Kubernetes часто асоціюється з хмарними технологіями (cloud) через те, що обидві концепції мають спільну мету — забезпечити

масштабованість, автоматизацію та ефективне управління ресурсами для додатків. Kubernetes, як і хмарна система, включає балансування навантаження, розподіл ресурсів і автоматичне відновлення контейнерів після збоїв [1]. Хмарні платформи (AWS, Azure, Google Cloud) також надають ресурси автоматично і вимагають мінімального втручання користувача.

Як і в хмарних середовищах, Kubernetes дозволяє масштабувати додатки за необхідності, автоматично створюючи нові інстанси (екземпляри) контейнерів. Це схоже на масштабування ресурсів в хмарних інфраструктурах, де можна динамічно додавати або видаляти обчислювальні ресурси на основі попиту.

Хмарні сервіси надають можливість керування різними ресурсами, такими як віртуальні машини (VM), мережеві підключення, сховища і бази даних. Kubernetes забезпечує оркестрацію контейнеризованих додатків, що є аналогом такого управління на рівні додатків. І хмарні технології, і Kubernetes добре підходять для роботи з мікросервісною архітектурою. Вони дозволяють легко розгортати, масштабувати та підтримувати незалежні сервіси, з яких складається додаток, що є основним підходом у хмарних системах. Таким чином, імітація роботи алгоритму на Kubernetes є способом протестувати його, а можливо і повноцінно користуватись, якщо мова йде про сервер-провайдера, котрий не обслуговує клієнтів на рівні хмарної технології, а лиш надає локальні послуги хостінгу. Щобільше, то багато хмарних платформ використовують Kubernetes як основний механізм для управління контейнерами. Вони надають сервіси, що базуються на Kubernetes для спрощення розгортання та управління контейнеризованими додатками в хмарі. Сам Kubernetes був розроблений у Google, який відкрив доступ до вихідного коду проєкту Kubernetes у 2014. Google Kubernetes Engine (GKE) — сервіс від Google Cloud, побудований на основі Kubernetes. Так само існує Amazon Elastic Kubernetes Service (EKS) — сервіс від AWS для управління Kubernetes-кластерами (імітується за допомогою інструментів kOps або EKS-D) та Azure Kubernetes Service (AKS) — сервіс від Microsoft Azure для розгортання та управління Kubernetes.

Зважаючи на це, головною задачею тестування алгоритму є розгортання Kubernetes на локальних серверах. Можна навіть створити приватну хмару. **Minikube** - один з найпоширеніших інструментів для локальної інсталяції Kubernetes-кластера на одному вузлі (single-node). Він підходить для тестування та розробки. Minikube дозволяє працювати з Kubernetes на локальному комп'ютері, імітуючи хмарне середовище.

Іншим інструментом є **Kind (Kubernetes in Docker)**. Він дозволяє розгортати Kubernetes кластери безпосередньо у Docker-контейнерах. Це також хороший варіант для розробників, яким потрібно тестувати додатки в контейнерах.

Kubeadm - це інструмент для створення повноцінних кластерів Kubernetes на локальних машинах або віртуальних машинах. Він забезпечує більш повну конфігурацію, що підходить для тестування або навіть продакшн-оточень.

Також існує **MicroK8s**, але оскільки це легка реалізація Kubernetes від Canonical (розробники Ubuntu), він не дуже підходить для тестування габаритного алгоритму, адже створений для розгортання Kubernetes-кластер на малопотужних пристроях, таких як Raspberry Pi, але теж і на локальних машинах.

Отже, хмарні платформи використовують Kubernetes як один з основних інструментів для оркестрації контейнерів. Локальне розгортання Kubernetes дозволяє імітувати хмарну інфраструктуру для тестування та розробки. З допомогою Kubernetes можна імітувати хмарні системи AWS, Azure, Google Cloud [4], [5], [6] та інші локально, що надає можливості для тестування додатків та оркестрації додатків у хмарному контексті без необхідності використовувати реальні хмарні ресурси. Таким чином, розгорнувши Kubernetes за допомогою Minikube можна зімітувати потрібні мікросервіси та протестувати алгоритм пошуку доповняльних особин.

Метою статті є показати можливість використання алгоритму доповняльних мікросервісів як на локальному проєкті, запущеному на серверному провайдері чи хмарній системі, так і глобально для оркестрації всіх проєктів, мікросервісів та монолітів на рівні провайдера серверів чи хмари.

Виклад основного матеріалу

Суть алгоритму пошуку доповнень. Алгоритм спрямований на оптимізацію використаних ресурсів під час роботи багатокомпонентної системи, зокрема, при масштабуванні її вузлів для забезпечення покриття навантаження всіх користувачьких запитів. Алгоритм виглядає наступним чином. Під час пошуку комплементарних навантажень (мікросервісів) алгоритм виконує кластеризацію, в результаті чого екземпляри мікросервісів групуються за схожістю робочих шаблонів у класи еквівалентності. В межах кожної групи екземпляри сортуються за амплітудою використання ресурсів. Далі групи, що визначені як доплементарних мікросервісів. Екземпляри з протилежними шаблонами навантаження, але схожими амплітудами, комбінуються для ефективнішого використання ресурсів. Також можуть розглядатися пари з низькою

амплітудою для заповнення "пробілів". Алгоритм використовує жадібний підхід, щоб знайти перший екземпляр мікросервісу, що відповідає критеріям доповнення. Якщо доповнення в межах першої групи не знайдено, зберігається статистика комбінацій з усіма екземплярами, і пошук триває до знаходження доповнень або вичерпання доповняльних груп. Процес повторюється до знаходження всіх можливих пар, хоча залишкові екземпляри мікросервісів є очікуваними. Для мікросервісів, що не знайшли доповнень, застосовується додатковий аналіз екстремумів з використанням середнього та стандартного відхилення, щоб підвищити ймовірність знайти комплементи. Кластеризація і пошук продовжуються до останньої успішної спроби. Якщо залишається невелика кількість мікросервісів без пари, вони комбінуються за допомогою рішення задачі про множинний рюкзак [2, 7, 8].

Методи збору вхідних даних. Алгоритм базується на статистичних даних, запропонованих в першу чергу розробниками програмного забезпечення (ПЗ). Ці дані важливі для початкової класифікації мікропроцесора, вибору йому пари. При неправильному виборі пари, результати алгоритму не будуть кращими, ніж стандартні. Вартість помилки збору початкових даних не дуже велика, адже клауд-провайдер знімає і свої метрики, котрі будуть застосовуватись на наступних ітераціях. Аби коректно провести збір даних, слід користуватись додатковими інструментами. Шаплони інструментів для збору та обробки метрик мікросервісів такі: система моніторингу та збору метрик, яка добре інтегрується з Kubernetes (напр., Prometheus); інструмент для візуалізації метрик (напр., Grafana, Kibana); інструменти для збору та обробки логів. В логах можуть бути додаткові метрики, які можуть бути необхідні для формування повної картини у розробників ПЗ (напр., Fluentd або Logstash, Grafana Loki, ElasticSearch). Оскільки для хмарного провайдера головне — самі метрики, а не їх візуалізація, нижче описано деталі стосовно роботи Prometheus.

Prometheus — це потужна система для моніторингу та збирання метрик, яка працює шляхом надсилання HTTP-запитів до інтерфейсу взаємодії (API, endpoints), що повертає необхідні метрики. Такий інтерфейс з локальними метриками має бути написаний в застосунках та сервісах, які потребують моніторингу. Зібрані дані зберігаються в спеціалізованій базі даних часових рядів Prometheus, що забезпечує високу ефективність і швидкість доступу до інформації, надає можливість оперативно аналізувати зміни у метриках із плином часу. Ця система є чудовим вибором для моніторингу використання ресурсів, таких як CPU, RAM і мережеві інтерфейси, оскільки містить в собі Node Exporter для експорту цих даних [9]. Prometheus підтримує кілька форматів даних, серед яких простий текстовий формат і OpenMetrics. Він здатен збирати метрики з різноманітних джерел, таких як веб-сервери, бази даних, апаратні пристрої, користувацькі застосунки.

Розглянемо основні функції Prometheus.

Для розробників при аналізі проблем продуктивності системи та статистики буде корисними PromQL (Prometheus Query Language) — потужна мова запитів, яка дозволяє гнучко запитувати та аналізувати

збережені дані. Для моніторингу системи в реальному часі в Prometheus існує механізм для створення сповіщення на основі заздалегідь визначених умов. Ці сповіщення обробляються через Alertmanager, який може інтегруватися з різними системами сповіщень, такими як електронна пошта, Slack або PagerDuty, забезпечуючи своєчасну реакцію на критичні події.

Альтернативу Prometheus в розрізі збору та збереження метрик по ресурсах для часових рядів складають **InfluxDB та Telegraf**. Telegraf - агент, який збирає дані про використання CPU, RAM, дискові ресурси та мережеві інтерфейси з різних джерел і передає їх в InfluxDB. InfluxDB - одна з найпотужніших баз даних часових рядів, оптимізована для високошвидкісного зберігання і запитів з InfluxQL - SQL-подібна мова запитів, що дозволяє виконувати складні запити для аналізу продуктивності систем у реальному часі. Також можна користуватись **Zabbix**, безплатним інструментом для збору різного роду метрик та логів, що працює через власні агенти або SNMP. Він має розвинену систему сповіщень і підтримує візуалізацію часових рядів.

Для здійснення професійного моніторингу на хмарному провайдері корисним інструментом буде комерційний хмарний сервіс **Datadog**. Він надає прості в налаштуванні агенти для збору метрик з серверів, контейнерів і хмарних платформ, таких як AWS, Azure чи GCP. Ним зручно збирати метрики, відстежувати ресурси та аналізувати продуктивність систем у реальному часі. Додатково, для старту та налаштування роботи системи, корисними будуть автоматичні дашборди - візуалізації з зібраних даних. Іншими доступними аналогами є New Relic, VictoriaMetrics та Netdata, які працюють з часовими рядами, великими даними та знімають потрібні метрики [9, 10]. Найуніверсальнішим, з відкритим кодом (opensource) та безплатним є Prometheus. З ним інтегруються багато додаткових інструментів, а головне - він співпрацює з Kubernetes за допомогою додатків Thanos або Cortex. Вони дозволяють масштабувати Prometheus для довготривалого зберігання метрик і роботи з розподіленими кластерами Kubernetes. Вони додають реплікацію, що забезпечує резервне зберігання, захист від втрат даних і централізацію метрик із декількох кластерів.

Мови програмування для написання скриптів. Обрана мова програмування має добре співпрацювати як з Kubernetes, так і з системою збору метрик. Як останню, оберемо Prometheus. До нього існують бібліотеки від виробника на шість мов програмування, а також додаткові бібліотеки для всіх поширених мов [11]. Kubernetes написаний на **Go**. Вона забезпечує високу продуктивність та інтеграцію з системою. Іншою поширеною та зручною мовою для написання скриптів, які можуть обробляти та аналізувати метрики є **Python**. Бібліотеки до цих мов написані авторами Prometheus, а отже є гарантія якості та підтримка в разі виникнення проблем. Для Python використовується бібліотека kubernetes-client, а для Go - client-go. Тому пропонується обрати одну з цих мов для виконання алгоритму пошуку доповнень для Kubernetes та хмарних систем.

Налаштування Kubernetes для виконання алгоритму. У Kubernetes можна налаштувати інтелектуальний розподіл мікросервісів між подами та

вузлами, використовуючи різні механізми, такі як планувальники (schedulers) [12], політики аффініті та антиаффініті - приналежність до певних вузлів, чи навпаки, про які розказано нижче, а також метрики для масштабування і «розігріву» ресурсів. Для застосування алгоритму розподілу навантаження для вирішення, на які поди направляти додатки, базуючись на ряді факторів, таких як наявність ресурсів (CPU, RAM) та визначення кількості подів на вузлі, слід інтегрувати зовнішні інструменти та метрики з бази даних для детального планування та передбачуваного "гарячого розігріву" (hot standby) [13] вузлів.

Node Affinity і Pod Affinity/Anti-affinity - це механізми, що дозволяють задавати правила для планувальника, щоб він розміщував поди на конкретних вузлах або на основі близькості до інших подів. Наприклад, можна сказати Kubernetes розміщувати певні мікросервіси ближче один до одного або навпаки – розподіляти їх на різні вузли для зменшення навантаження.

Механізм **Custom Schedulers** дає можливість розробити власний планувальник (scheduler) [12, 13], який буде враховувати зазначені в алгоритмі фактори або для розподілу подів між вузлами. На цьому етапі, можна інтегрувати метрики з БД, щоб впливати на рішення планувальника.

За допомогою **Taints and Tolerations** можна "позначати" вузли, щоб певні поди могли бути розгорнуті тільки на них або уникати цих вузлів. Це корисно для управління подами, на яких навантаження може сильно змінюватись, аби запобігти ситуації призначення додаткового навантаження на вузол в той час, як скоро вільний простір на вузлі зникне. За умови додаткового навантаження надолгось би робити додатковий небажаний скейлінг [15].

Щоб реалізувати "гарячий розігрів" [13] вузлів на основі метрик, можна інтегрувати рішення на базі **Horizontal Pod Autoscaler (HPA)** - додавання додаткових вузлів або цю задачу теж покласти на алгоритм на основі статистики метрик. Останнє допоможе запобігати піковому навантаженню і дасть більше часу для розігріву нової ноди. Горизонтальне автомасштабування використовує метрики, такі як CPU і пам'ять, для автоматичного збільшення або зменшення кількості подів на основі навантаження [16]. Витягнути метрики з бази даних і використовувати їх у HPA можна використовуючи **Custom Metrics API** або **Prometheus Adapter**.

Іншим механізмом масштабування є **Vertical Pod Autoscaler (VPA)** дозволяє автоматично змінювати кількість ресурсів (CPU, пам'ять) для окремих подів, але у цього підходу є обмеження. При зміні кількості ресурсу под необхідно перезавантажувати, таким чином це не може бути єдиний под для мікросервісу, щоб не припинити обслуговування додатка [15], а також це бажаніше робити при зменшенні навантаження, а не збільшенні, щоб не переставати обслуговувати пікового навантаження користувачів та щоб не спричинити потенційних проблем обслуговування користувачів пов'язаних з перевантаженням додатка. Таким чином, алгоритм пошуку доповнень орієнтований на горизонтальне розширення, котре гарантовано даватиме необхідний результат та буде

більш передбачуване, не ставлячи під загрозу забезпечення сервісом користувачів. Додатково слід відмітити Kubernetes Event-Driven Autoscaling (KEDA), що дозволяє масштабувати поди на основі подій або зовнішніх метрик, таких як повідомлення з черг, HTTP-запитів, або аналітики з баз даних. KEDA підтримує інтеграцію з Prometheus, Azure Monitor, AWS CloudWatch та іншими системами збору метрик. В разі раптової зміни обстановки можна скористатись цим механізмом, але на цей час алгоритм доповнювальних навантажень це не передбачає.

Висновки

У статті розглянуто засоби реалізації алгоритму пошуку доповнювальних навантажень [7] локально з метою перевірити якість його роботи та за потреби скористатись ним при деплої власного програмного забезпечення на хмарну систему. Все ж, планується,

що даний алгоритм застосовуватиметься більше на всій хмарі, адже його ефективність тоді буде вищою.

Основною технологією для реалізації алгоритму пропонується взяти Kubernetes. Як локальний помічник може виступати Minicube. Prometheus - пропонується система для зняття метрик. Аналіз метрик слід покласти частково на Python або Go, а частково на Kubernetes. Написавши власний планувальник (Custom Scheduler) з використанням обмежень, таких як афініті, антиафініті та толерації - характеристики прив'язаності до вузлів та подів для формування правил розгортання додаткових вузлів на етапі горизонтального масштабування, яке передбачене алгоритмом.

Впровадження алгоритму доповнювальних навантажень сприятиме зменшенню кількості необхідних серверів для хостінгу, оптимізації енергетичних ресурсів та як результат, меншому негативному впливу на екологію через антропогенний фактор.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. "Що таке Kubernetes?," Kubernetes. Accessed: Oct. 22, 2024. Available: <https://kubernetes.io/uk/docs/concepts/overview/what-is-kubernetes/>
2. O. Dmytrenko, M. Skulysh, and L. Globa, "Microservice Complimentary Groups Determination Algorithm for the Effective Resource Usage," CEUR Workshop Proc. Forthcom., no. Scientific and Practical Programming-UkrPROG 2024, p. 20.
3. Docker. Available: <https://www.docker.com/resources/what-container/>
4. S. Al-Raheym, S. C. Açan, and Ö. T. Pusatli, "Investigation Of Amazon And Google For Fault Tolerance Strategies In Cloud Computing Services," AJIT-E Online Acad. J. Inf. Technol., vol. 7, no. 23, pp. 7–22, Nov. 2016, doi: 10.5824/1309-1581.2016.4.001.x.
5. A. Belgacem, "Dynamic resource allocation in cloud computing: analysis and taxonomies," Computing, vol. 104, no. 3, pp. 681–710, Mar. 2022, doi: 10.1007/s00607-021-01045-2.
6. E. R. Jamzuri, R. Analia, H. Mandala, and S. Susanto, "Cloud-Based Architecture for YOLOv3 Object Detector using gRPC and Protobuf," J. Tek. Elektro, vol. Vol 14, No 1, pp. 18–23, 2022.
7. O. Dmytrenko and M. Skulysh, "Визначення мікропроцесорних груп для ефективного використання процесорних потужностей," Probl. Program. Forthcom., no. №2-3, Sep. 2024, Available: https://docs.google.com/document/d/1ocqA-e7d-OAibFVGiEE2UcxZRKgYNn_yPX6e94dHwYM/edit?usp=sharing
8. O. Dmytrenko and M. Skulysh, "Method of Grouping Complementary Microservices Using Fuzzy Lattice Theory," vol. 12, no. 1, pp. 11–18, Mar. 2024, doi: 10.25673/115636.
9. "Що таке Prometheus? | Адміністрування серверів та cloud рішень." Accessed: Oct. 22, 2024. Available: <https://itfb.com.ua/uk/shho-take-prometheus/>
10. Prometheus, "Overview | Prometheus." Accessed: Oct. 23, 2024. Available: <https://prometheus.io/docs/introduction/overview/>
11. Prometheus, "Client libraries | Prometheus." Available: <https://prometheus.io/docs/instrumenting/clientlibs/>
12. P. Salot, "A Survey of Various Scheduling Algorithm in Cloud Computing Environment," Int. J. Res. Eng. Technol., vol. 02, no. 02, pp. 131–135, Feb. 2013, doi: 10.15623/ijret.2013.0202008.
13. O. Dmytrenko and M. Skulysh, "Fault Tolerance Redundancy Methods for IoT Devices," Infocommunication Comput. Technol., vol. 2(04), no. University "Ukraine," pp. 59–65, Dec. 2022.
14. Kubernetes Team, "Kubernetes Scheduler." Kubernetes Documentation, Dec. 14, 2023. Available: <https://kubernetes.io/docs/concepts/scheduling-eviction/kube-scheduler/>
15. "Vertical Pod autoscaling | Google Kubernetes Engine (GKE)," Google Cloud. Accessed: Jul. 14, 2024. Available: <https://cloud.google.com/kubernetes-engine/docs/concepts/verticalpodautoscaler>
16. "Kubernetes Autoscaling: Horizontal and Vertical explained." Accessed: Oct. 23, 2024. Available: <https://www.fullstack.com/knowledge-hub/blogs/autoscaling-in-kubernetes>

Received (Надійшла) 20.09.2024

(Accepted for publication) Прийнята до друку 13.11.2024

Methods of data collection and implementation of accomplishing loads algorithm

O. Dmytrenko, M. Skulysh

Abstract: The article addresses the issue of efficient resource utilization in cloud computing environments, which has become increasingly important due to the growing demand for computational power. The presented algorithm focuses on optimizing the load distribution generated by microservices and monoliths across server nodes, aiming to maximize the usage of available resources. The article focuses on technologies that help replicate the algorithm locally for testing and adaptation to specific needs. It compares methods for collecting metrics, as well as environments where the algorithm can be implemented. Special attention is given to Kubernetes and the possibilities of applying different microservice distribution mechanisms, such as Node Affinity, Pod Affinity/Anti-Affinity, and custom schedulers. For proactive scaling, including "hot start" of nodes, the use of Horizontal Pod Autoscaler with system element metrics is proposed.

Keywords: Kubernetes, metric collection, complementary loads, cloud systems, microservice architecture, monoliths.

В. О. Дяченко, С. П. Зубенко, А. С. Лубан, В. М. Федорченко

Харківський національний технічний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ РОЗРОБКИ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

Анотація. Актуальність. Спеціалізовані інтегральні схеми (ASIC) є ключовими компонентами для систем управління роботами, оскільки вони забезпечують високу продуктивність і ефективність обробки. Використовуються для обробки даних з сенсорів, таких як камери, лідари та інші датчики. Вони забезпечують швидку і точну обробку сигналів, необхідних для навігації та виявлення об'єктів. ASIC можуть бути налаштовані для управління різними двигунами. Вони забезпечують точне і швидке керування рухами роботів, що є критично важливим для промислових роботів і роботів-маніпуляторів. Також забезпечують високошвидкісну передачу даних між різними модулями системи робототехніки. Це можуть бути інтерфейси для зв'язку між процесорами, сенсорами та актуаторами. ASIC використовуються для оптимізації споживання енергії, що є важливим аспектом для мобільних роботів та безпілотних апаратів, які працюють на акумуляторах. В деяких випадках ASIC спеціалізуються на виконанні алгоритмів машинного навчання і нейронних мереж, що дозволяє роботам здійснювати складні завдання, такі як розпізнавання об'єктів та прийняття рішень в реальному часі. ASIC розробляються для виконання конкретних завдань, що дозволяє значно підвищити їх продуктивність у порівнянні з універсальними процесорами. Це особливо важливо для систем управління роботами, де необхідна швидка обробка даних у реальному часі. Спеціалізовані схеми споживають менше енергії порівняно з універсальними рішеннями, оскільки вони оптимізовані для виконання конкретних функцій. Це критично важливо для автономних роботів і пристроїв, що працюють на батареях. ASIC дозволяють зменшити розміри системи за рахунок високого рівня інтеграції компонентів. Це сприяє створенню компактних робототехнічних рішень, які можуть бути використані в функціонуванні мобільних роботів. Спеціалізовані інтегральні схеми забезпечують високий рівень надійності та безпеки, оскільки вони спроектовані для роботи у визначених умовах та з конкретними завданнями. Це зменшує ризик виникнення помилок або збоїв у роботі системи. Для великих обсягів виробництва розробка і використання ASIC може бути економічно вигіднішою, оскільки вона дозволяє знизити вартість одного чіпа завдяки масштабованому виробництву. Використання ASIC дозволяє швидше впроваджувати нові технології та алгоритми, оскільки спеціалізовані рішення можуть бути швидко адаптовані для підтримки нових функцій і можливостей. Всі ці фактори роблять розробку ASIC актуальною та надає можливість створювати унікальні архітектури, які максимально відповідають вимогам конкретних систем управління, що забезпечує їх оптимальну роботу. **Метою даної роботи** є дослідження існуючих методів та інструментів розробки спеціалізованих інтегральних схем для мобільних систем управління. **Об'єктом дослідження** є функціонування спеціалізованих інтегральних схем. **Предметом дослідження** є методи забезпечення енергоефективності спеціалізованих інтегральних схем. **Результати.** Проведено аналіз існуючих методів та інструментів розробки спеціалізованих інтегральних схем для мобільних систем управління. Використання ASIC для обробки сигналів і зображень у робототехніці дозволяє досягати високої продуктивності, ефективності та точності, що є критично важливим для багатьох застосувань. Це забезпечує роботам можливість швидко і точно реагувати на зміни в навколишньому середовищі та виконувати складні завдання з високою ефективністю. При управлінні рухом досягається висока точність, ефективність та надійність систем управління, а також відкриває нові можливості для створення більш складних і функціональних роботизованих систем, здатних виконувати широкий спектр завдань у різних галузях, включаючи промисловість, медицину, транспорт і побутові застосування. Хоча ASIC не є універсальними у звичайному розумінні, вони забезпечують високу продуктивність, енергоефективність і надійність для специфічних завдань. У додатках з визначеними вимогами і великими обсягами виробництва, де висока продуктивність і енергоефективність є критичними, використання ASIC є виправданим і ефективним рішенням. Для інших випадків можуть бути доцільними гібридні підходи, що поєднують переваги ASIC і універсальних рішень, таких як FPGA або універсальні процесори.

Ключові слова: ASIC, EDA, FPGA, Synopsys, енергоефективність, машинне навчання, робототехніка, мобільні системи управління, Mentor Graphics.

Вступ

Розробка спеціалізованих інтегральних схем [1] (ASIC) для мобільних систем управління вимагає особливих методів і підходів через обмеження, такі як розмір, енергоспоживання [2] та вимоги до продуктивності. Вона містить включає декілька основних методів та етапів, які забезпечують ефективність, компактність і низьке енергоспоживання: аналіз вимог, архітектурне проектування, моделювання та симуляцію, синтез і оптимізацію, фізичне проектування, верифікацію та тестування, енергоменеджмент, інтеграцію та тестування системи, термінальні та фізичні випробування, зворотній зв'язок та вдосконалення. Ці методи дозволяють створювати ефективні, компактні і енергоефективні спеціалізовані інтегральні схеми для мобільних систем управління

[3], забезпечуючи їх надійність і високу продуктивність. Для реалізації цих методів використовуються інструменти автоматизованого проектування (EDA), такі як Synopsys, Cadence, Mentor Graphics, які забезпечують всі необхідні етапи від концептуального проектування до фізичної реалізації і тестування чіпів. Ці інструменти забезпечують автоматизацію різних етапів проектування. Інструменти EDA забезпечують комплексний підхід до розробки ASIC, автоматизуючи більшість етапів процесу і забезпечуючи високу точність і ефективність проектування. Актуальність застосування інструментів EDA до розробки ASIC є надзвичайно високою, зважаючи на численні переваги, які вони надають у сучасних умовах.

Метою цієї роботи є дослідження існуючих методів та інструментів розробки спеціалізованих інтегральних схем для мобільних систем управління.

Основна частина

Обробка сигналів і зображень є критично важливою для робототехніки, оскільки роботи повинні сприймати і аналізувати навколишнє середовище для виконання своїх завдань. Використання спеціалізованих інтегральних схем (ASIC) для цих цілей забезпечує високу продуктивність і ефективність. ASIC використовуються для прискорення алгоритмів розпізнавання об'єктів на зображеннях, що дозволяє роботам швидко і точно ідентифікувати предмети в їхньому оточенні. Це важливо для навігації [4], уникнення перешкод і виконання конкретних завдань, таких як сортування об'єктів на виробничих лініях. Спеціалізовані схеми можуть обробляти відеопотоки в реальному часі для виявлення та відстеження рухомих об'єктів. Це особливо важливо для автономних транспортних засобів, дронів та систем безпеки, де необхідно реагувати на рухомі об'єкти. ASIC можуть виконувати апаратне стиснення і декодування зображень та відео, що дозволяє зменшити обсяг даних для зберігання і передачі без втрати якості. Це важливо для систем з обмеженими ресурсами пам'яті та пропускну здатності.

Спеціалізовані інтегральні схеми дозволяють виконувати складні алгоритми аналізу зображень, такі як виявлення країв, сегментація зображень, аналіз текстур і кольорів. Це дозволяє роботам краще розуміти структуру і зміст зображень. Існує декілька прикладів використання ASIC для обробки сигналів: NVIDIA Jetson, Google Edge TPU, Intel Movidius Myriad, Vision Processing Unit (VPU).

Платформи NVIDIA Jetson використовують спеціалізовані графічні процесори (GPU) та ASIC для прискорення алгоритмів машинного навчання і комп'ютерного зору. Вони широко використовуються в автономних роботах, дронах та транспортних засобах.

Google розробила спеціалізовані інтегральні схеми для прискорення обробки нейронних мереж на периферії мережі. Вони використовуються для виконання завдань машинного навчання на місці, без необхідності передачі даних у хмару. Чіпи Movidius Myriad спеціалізуються на обробці зображень і комп'ютерному зорі. Вони використовуються в дронах, камерах та інших пристроях, де важливо мати високу продуктивність при низькому енергоспоживанні. VPU – це спеціалізовані процесори для обробки візуальних даних, що забезпечують високу продуктивність і енергоефективність для завдань комп'ютерного зору. Перевагами використання ASIC для обробки сигналів та зображень є висока продуктивність, енергетична ефективність, мінімальні затримки, компактність та інтеграція.

Іншим напрямком використання ASIC є управління рухом в мобільних системах або робототехніці. Спеціалізовані інтегральні схеми забезпечують точне управління різними типами двигунів (електродвигунами, серводвигунами, кроковими двигунами), що дозволяє досягати високої точності і плавності рухів. Це важливо для роботів-маніпуляторів, автономних транспортних засобів та дронів. Використання ASIC для управління рухом у робототехніці дозволяє досягти високої точності, швидкості та енергоефективності. Управління рухом включає координацію різних двигунів і

механізмів, які відповідають за переміщення роботів, маніпуляторів та інших рухомих частин. Основними аспектами використання ASIC для управління рухом є: контроль двигунів, швидка обробка сигналів, інтеграція з сенсорами, енергоефективність, підтримка складних алгоритмів управління. ASIC забезпечують точне управління різними типами двигунів, такими як DC-мотори, серводвигуни та крокові двигуни. Це включає регулювання швидкості, положення та крутного моменту. Висока швидкість обробки дозволяє ASIC швидко реагувати на зміни вхідних сигналів від сенсорів та інших компонентів системи управління, забезпечуючи плавний і точний рух. ASIC можуть інтегруватися з різними сенсорами, такими як енкодери, акселерометри, гіроскопи та інші датчики [5], для забезпечення зворотного зв'язку і корекції руху в реальному часі. Завдяки оптимізації для конкретних завдань, ASIC забезпечують високу енергоефективність, що є важливим для мобільних та автономних роботів, які працюють на батареях. ASIC можуть реалізовувати складні алгоритми управління, такі як пропорційно-інтегрально-диференціальне (PID) регулювання, адаптивне управління та передбачувальне управління, забезпечуючи високий рівень точності і стабільності.

Прикладами використання є роботи-маніпулятори, автономні транспортні засоби, мобільні роботи, дрони та безпілотні летальні апарати (БПЛА), а також медичні роботи. У промислових роботах-маніпуляторах ASIC використовуються для точного контролю кожного суглоба і сегмента, що забезпечує високу точність виконання складних виробничих завдань. ASIC управляють приводними системами та системами рульового управління, забезпечуючи точне маневрування, дотримання траєкторії та уникнення перешкод. У мобільних роботах ASIC використовуються для управління рухом колес або гусениць, забезпечуючи плавний рух і точне позиціонування в просторі. ASIC управляють двигунами та пропелерами дронів, забезпечуючи стабільний політ, корекцію положення та виконання маневрів. У хірургічних роботах ASIC забезпечують точне управління інструментами та маніпуляторами, що дозволяє виконувати складні операції з високою точністю. Перевагами використання ASIC для управління рухом є: висока продуктивність (спеціалізовані схеми забезпечують високу швидкість і точність обробки даних, що дозволяє реалізовувати складні алгоритми управління в реальному часі); низьке енергоспоживання (оптимізація під конкретні завдання дозволяє знизити енергоспоживання, що є важливим для автономних роботів); компактність та інтеграція (ASIC можуть об'єднувати декілька функцій в одному чіпі, зменшуючи розмір і вагу системи управління); надійність і стабільність (спеціалізовані інтегральні схеми забезпечують високу надійність і стабільність роботи навіть у складних умовах експлуатації); гнучкість і масштабованість (ASIC можна налаштувати під специфічні вимоги різних застосувань, що робить їх універсальними для різних типів роботів і систем).

ASIC забезпечують високошвидкісну та надійну комунікацію між різними модулями робототехнічних систем. Це включає обмін даними між процесорами, сенсорами та актуаторами, що дозволяє інтегрувати

різні компоненти в єдину систему. Забезпечення комунікації між модулями робототехнічних систем за допомогою спеціалізованих інтегральних схем (ASIC) є критично важливим для ефективного функціонування роботів. ASIC забезпечують високу швидкість передачі даних, надійність і енергоефективність, що є ключовими факторами для успішної інтеграції різних компонентів у робототехнічних системах. Основними аспектами забезпечення комунікації за допомогою ASIC є: високошвидкісна передача даних, низька затримка, енергоефективність, надійність та стабільність, підтримка різних інтерфейсів. ASIC забезпечують високу пропускну здатність і швидкість передачі даних між модулями, що дозволяє роботам обробляти великі обсяги інформації в реальному часі. Завдяки оптимізації для конкретних задач комунікації, ASIC забезпечують мінімальні затримки при передачі даних, що є критично важливим для координації роботи різних компонентів системи. Спеціалізовані інтегральні схеми забезпечують високу надійність і стабільність комунікаційних з'єднань, що зменшує ризик виникнення помилок і збоїв у роботі системи. ASIC можуть підтримувати різні комунікаційні інтерфейси, такі як I2C, SPI, UART, CAN, Ethernet, що забезпечує гнучкість в інтеграції різних модулів.

В якості прикладів використання ASIC для комунікації між модулями можуть бути розподілені роботизовані системи, автономні транспортні засоби, індустриальні роботи та медичні роботи. У системах з великою кількістю сенсорів і актуаторів, ASIC забезпечують ефективну передачу даних між цими компонентами, що дозволяє роботу приймати обґрунтовані рішення в реальному часі. Для автономних автомобілів ASIC використовуються для координації роботи різних систем, таких як сенсори, блоки управління рухом, системи безпеки і комунікації з іншими автомобілями. У промислових роботах, які виконують складні виробничі операції, ASIC забезпечують швидку і надійну комунікацію між маніпуляторами, контролерами та системами управління. В медичних роботах, таких як хірургічні системи, ASIC дозволяють забезпечити синхронізовану роботу різних інструментів та систем моніторингу, що підвищує точність і безпеку операцій. Перевагами використання ASIC для комунікації між модулями є: оптимізація під конкретні завдання, зниження складності системи, масштабованість, захист і безпека даних. ASIC проектується з урахуванням специфічних вимог комунікації, що дозволяє досягти оптимальної продуктивності і надійності. Використання ASIC дозволяє інтегрувати кілька функцій в одному чіпі, що зменшує кількість компонентів і складність системи. ASIC можуть бути масштабованими для підтримки різних розмірів і складностей робототехнічних систем, що робить їх універсальними для різних застосувань. Спеціалізовані схеми можуть включати вбудовані засоби захисту даних і криптографії, що забезпечує безпеку комунікацій між модулями.

Використання ASIC для зниження енергоспоживання є критично важливим у багатьох сучасних робототехнічних системах. ASIC розробляються для виконання специфічних функцій, що дозволяє оптимізувати їх роботу і знизити енергоспоживання в

порівнянні з універсальними рішеннями, такими як процесори загального призначення. Використання технологій динамічного регулювання напруги і частоти (DVFS) дозволяє адаптувати енергоспоживання до поточних завдань. ASIC можуть включати спеціальні режими енергозбереження, такі як сплячі режими (sleep modes) і режими низького споживання (low-power modes), що дозволяють знизити енергоспоживання під час періодів низької активності. Об'єднання кількох функцій на одному чіпі дозволяє знизити енергоспоживання, оскільки зменшується кількість зовнішніх з'єднань і відповідних енергетичних втрат. Розробка ASIC з використанням архітектур, оптимізованих для енергоефективності, таких як асинхронні схеми або схеми з низьким енергоспоживанням, дозволяє досягти значного зниження енергоспоживання. Використовується у мобільних роботах та дронах, промислових роботах, медичних пристроях та побутовій електроніці. Перевагами використання є: висока енергоефективність, компактність і легкість, зниження тепловиділення, продовження часу автономної роботи. Також існують ASIC, які розроблені спеціально для машинного навчання [6], забезпечують високу продуктивність при значно нижчому енергоспоживанні, що робить їх ідеальними для різних застосувань, від центрів обробки даних до мобільних пристроїв і вбудованих систем. Основними аспектами їх використання для машинного навчання є: висока продуктивність, енергоефективність, підтримка великих обсягів даних, низька затримка. З переваг можна виділити оптимізація під конкретні завдання, зниження вартості, підвищену надійність та зменшення тепловиділення [7, 8].

Висновки

Проведено аналіз існуючих методів та інструментів розробки спеціалізованих інтегральних схем для мобільних систем управління. Використання ASIC для обробки сигналів і зображень у робототехніці дозволяє досягати високої продуктивності, ефективності та точності, що є критично важливим для багатьох застосувань. Це забезпечує роботам можливість швидко і точно реагувати на зміни в навколишньому середовищі та виконувати складні завдання з високою ефективністю. При управлінні рухом досягається висока точність, ефективність та надійність систем управління. Це відкриває нові можливості для створення більш складних і функціональних роботизованих систем, здатних виконувати широкий спектр завдань у різних галузях, включаючи промисловість, медицину, транспорт і побутові застосування. Також використання ASIC забезпечує комунікації між модулями робототехнічних систем є ключовим фактором для досягнення високої продуктивності, надійності та енергоефективності роботизованих систем. Це дозволяє створювати складні інтегровані рішення, здатні виконувати широкий спектр завдань у різних галузях, таких як промисловість, медицина, транспорт і побутові застосування. Завдяки високій енергоефективності, спеціалізовані інтегральні схеми дозволяють створювати автономні пристрої з тривалим часом роботи, знижуючи тепловиділення і підвищуючи загальну ефективність систем. Це відкриває нові можливості для

використання робототехніки у різних галузях, від промисловості до медицини і побутової електроніки.

В деяких випадках ASIC використовуються для завдань машинного навчання, що дозволяє досягти високої продуктивності, ефективності та надійності, що є критично важливим для сучасних додатків. Завдяки спеціалізації під конкретні завдання, ASIC забезпечують оптимальну продуктивність і низьке енергоспоживання, що робить їх незамінними для складних і ресурсомістких завдань машинного навчання.

Хоча ASIC не є універсальними у звичайному розумінні, вони забезпечують високу продуктивність, енергоефективність і надійність для специфічних завдань. У додатках з визначеними вимогами і великими обсягами виробництва, де висока продуктивність і енергоефективність є критичними, використання ASIC є виправданим і ефективним рішенням. Для інших випадків можуть бути доцільними гібридні підходи, що поєднують переваги ASIC і універсальних рішень, таких як FPGA або універсальні процесори.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Munister V. Network-on-Chip & SoC Architecture. Educational and practical publication // Glucksritter.2021. – p.92–100.
2. Дяченко В. Інтелектуальні підходи енергозбереження у безпроводних сенсорних комп'ютерних мережах // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2020. – Т. 4 (62). – С. 114-118. – doi:https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.4.114.
3. Boyd B., Gauci J., Robertson M., Nguyen V., Gupta R., Gucer V., Kislicins V. Building Real-time Mobile Solutions withMQTT and IBM MessageSight. IBM.2014.p.21-38.
4. Yick, J., Mukherjee, B., Ghosal, D. Analysis of a Prediction-based Mobility Adaptive Tracking Algorithm // Proceedings of the IEEE Second International Conference on Broadband Networks (BROADNETS), Boston. 2005. Vol. 1. P. 753–760
5. Abbas, I., Liu, J., Faheem, M., Noor, R. S. Different sensor based intelligent spraying systems in Agriculture // Sensors and Actuators A: Physical. 2020. Volume 316. P. 1–16.
6. Das, K., Behera, R. N. A survey on machine learning: concept, algorithms and applications // International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. 2017. 5(2). P. 1301–1309.
7. Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems / Raghunathan, V., Kansai, A., Hse, J., Friedman, J., Srivastava, M. // Proceedings of the IPSN. 2005. P. 457–462.
8. Yu, Z., Tsai, J. J. P. A Framework of Machine Learning Based Intrusion Detection for Wireless Sensor Networks // 2008 IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing. 2008. P. 272–279.

Received (Надійшла) 12.04.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.06.2024

Methods and tools of the development of specialized integrated circuits for mobile control systems

Vladyslav Diachenko, Serhiy Zubenko, Luban Artem, Volodymyr Fedorchenko

Abstract. Relevance. Application-specific integrated circuits (ASICs) are key components for robot control systems because they provide high performance and processing efficiency. They are used to process data from sensors, such as cameras, lidar and other sensors. They provide fast and accurate signal processing necessary for navigation and object detection. ASICs can be configured to control various motors (DC, servo motors, stepper motors). They provide accurate and fast control of robot movements, which is critically important for industrial robots and robot manipulators. They also provide high-speed data transfer between various modules of the robotics system. These can be interfaces for communication between processors, sensors and actuators. ASICs are used to optimize power consumption, an important aspect for mobile robots and battery-powered drones. In some cases, ASICs specialize in running machine learning algorithms and neural networks, enabling robots to perform complex tasks such as object recognition and real-time decision making. ASICs are developed to perform specific tasks, which allows to significantly increase their performance compared to universal processors. This is especially important for robot control systems, where fast real-time data processing is required. Specialized circuits consume less energy compared to universal solutions because they are optimized to perform specific functions. This is critical for autonomous robots and battery-powered devices. ASICs make it possible to reduce the size of the system due to a high level of integration of components. This contributes to the creation of compact robotic solutions that can be used in narrow spaces or on board mobile robots. Specialized integrated circuits provide a high level of reliability and safety, as they are designed to work in specific conditions and with specific tasks. This reduces the risk of errors or system failures. For high-volume production, the development and use of an ASIC can be more cost-effective, as it allows for lower cost per chip due to large-scale production. The use of ASIC allows faster implementation of new technologies and algorithms, as specialized solutions can be quickly adapted to support new functions and capabilities. All these factors make the development of ASIC relevant and provide an opportunity to create unique architectures that maximally meet the requirements of specific control systems, which ensures their optimal operation. **The purpose** is to research existing methods and tools for the development of specialized integrated circuits for mobile control systems. **The object** operation of specialized integrated circuits. **The subject** are the methods of ensuring the energy efficiency of specialized integrated circuits. **Results** An analysis of existing methods and tools for the development of specialized integrated circuits for mobile control systems was carried out. The use of ASICs for signal and image processing in robotics allows for high productivity, efficiency, and accuracy, which is critical for many applications. This provides robots with the ability to quickly and accurately respond to changes in the environment and perform complex tasks with high efficiency. Motion control achieves high precision, efficiency and reliability of control systems, and also opens up new opportunities for creating more complex and functional robotic systems capable of performing a wide range of tasks in various industries, including industry, medicine, transport and domestic applications. Although ASICs are not general purpose in the usual sense, they provide high performance, power efficiency and reliability for specific tasks. In applications with defined requirements and large volumes of production, where high performance and energy efficiency are critical, the use of ASIC is a justified and effective solution. For other cases, hybrid approaches combining the advantages of ASICs and general-purpose solutions such as FPGAs or general-purpose processors may be appropriate.

Keywords: ASIC, EDA, FPGA, Synopsys, energy efficiency, machine learning, robotics, mobile control systems, Mentor Graphics.

О. С. Євтушенко, О. Ю. Заковоротний

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ КОЛИВАНЬ РУХОМОГО СКЛАДУ

Анотація. У роботі розглянуто актуальну сьогодні проблему підвищення максимальної швидкості залізничного транспорту, обмеження та перешкоди на шляху її вирішення і можливості подолання цих перешкод. Окремо розглянуто можливість підвищення максимальної швидкості поїзда на тих ділянках залізничного шляху, де це допустимо. Для реалізації цієї можливості актуальною є задача виявлення, аналізу та класифікації коливань, які виникають під час руху поїзда. Проведено огляд досліджень, присвячених використанню нейронних мереж у суміжних предметних галузях. За результатами аналізу досліджень пропонується для виконання поставленої задачі використовувати модифікацію нейронної мережі Growing Neural Gas – Growing When Required (GWR), яка є оптимальною для виконання задачі аналізу та класифікації коливань поїзда та має можливість донавчатися без пошкодження раніше засвоєної інформації. Розроблено структуру нейронної мережі GWR. Представлено алгоритм роботи нейронної мережі GWR.

Ключові слова: штучні нейронні мережі, Growing Neural Gas, GNG, Growing When Required, GWR, залізничний транспорт, аналіз коливань поїзда.

Вступ

Постановка проблеми. На сьогодні однією з головних дилем подальшого розвитку залізничного транспорту є питання подолання значних обмежень на максимальну швидкість руху. Основною причиною виникнення цих обмежень є дефекти залізничного покриття та динамічних елементів поїзда: тріщини, злами, різні види зносу, пластичні деформації, корозія, механічні пошкодження. Причинами їх виникнення є спільний вплив багатьох факторів, таких як тривала експлуатація, неякісне технічне обслуговування, погодні умови тощо. Пошкодження залізничного шляху та/або динамічних елементів поїзда можуть призвести до появи повздовжніх та поперечних коливальних процесів під час руху залізничного транспорту.

Не дивлячись на те, що подібні коливальні процеси є активними протягом усього процесу руху поїзда та проявляються і при русі на невеликих швидкостях, ця проблема є найбільш критичною для високошвидкісних поїздів, оскільки їх частини піддаються сильнішому впливу суворих умов у порівнянні з іншими поїздами. На характеристики цих динамічних процесів прямо впливає швидкість, з якою поїзд рухається, що призводить до виникнення значних обмежень максимальної швидкості рухомого складу.

Згідно з результатами досліджень, що були проведені в роботі [1], зростання амплітуди та частоти коливань на швидкостях 100-120 км/год є більш значним, ніж на швидкостях, нижче 100 км/год. Це призводить до виникнення складних перешкод у виконанні задачі підвищення максимальних швидкостей рухомого складу до відміток вище 120 км/год. Одним з шляхів часткового подолання цих перешкод є підвищення швидкості на тих залізничних ділянках, де кількість дефектів мінімальна, а отже амплітуда коливань незначна. Вирішення цієї задачі робить актуальною проблему виявлення та класифікація коливань, які виникають під час руху рухомого складу.

Аналіз останніх досліджень. Для класифікації коливань існує багато різноманітних методів, серед

яких найбільш перспективним є залучення нейронних мереж. Використання штучних нейронних мереж дає можливість швидко обробляти великі обсяги даних, виділяти в них складні закономірності та застосовувати визначені таким чином патерни для обробки нової інформації.

Штучні нейронні мережі вже успішно використовуються на залізничному транспорті для прогнозування температурного впливу на рейки [2], передбачення та попередження дефектів [3, 4], проведення оптимізації процесів технічного обслуговування [5], збереження та класифікація інформаційних даних для систем підтримки прийняття рішень [6]. Однак основними недоліками існуючих штучних нейронних мереж є відсутність можливості їх донавчання новою інформацією без втрат вже запам'ятованих раніше даних. Цей недолік можливо усунути завдяки використанню нейронних мереж Growing Neural Gas (GNG) та її модифікації – Growing When Required (GWR), яка добре пристосована до класифікації великих обсягів даних та може донавчатися у процесі функціонування. Це робить мережі GWR придатними для виконання поставленої задачі класифікації коливальних процесів.

Метою роботи є аналіз можливості застосування штучної нейронної мережі Growing When Required для виконання класифікації динамічних процесів, які виникають під час руху поїзда, розробка її структури та алгоритму роботи.

Основна частина

Для виконання поставленої мети розглянемо нейронну мережу Growing When Required (GWR), яка виникла як модифікація "Зростаючий нейронний газ" (Growing Neural Gas), який був запропонований Берндом Фріцке у 1995 році [7].

GNG був розроблений для вирішення проблем кластеризації та топологічного навчання шляхом динамічного збільшення кількості нейронів у мережі. Мережа базується на принципах конкурентного навчання і самонавчання, дозволяючи мережі поступово адаптуватися до вхідного простору.

GNG починається з невеликої кількості нейронів і поступово додає нові, коли виявляється, що поточна мережа не може адекватно представляти вхідні дані. Це дозволяє алгоритму зберігати топологічні властивості вже засвоєної інформації і адаптуватися до складних даних.

Попри свою ефективність, GNG має деякі обмеження:

1. Необхідність ручного налаштування параметрів. Кількість ітерацій, частота додавання нових нейронів та інші параметри потребують попереднього налаштування, що може бути складним завданням.

2. Потенційна надмірність. Через регулярне додавання нових нейронів мережа може стати надмірно великою, що знижує її ефективність.

3. Відсутність адаптації до потокових даних: GNG не завжди ефективно адаптується до даних, що надходять у реальному часі.

Для подолання деяких з цих обмежень була розроблена нейронна мережа Growing When Required [8]. Основна ідея зростаючої за необхідністю мережі полягає в тому, щоб додавати нові нейрони лише тоді, коли це дійсно необхідно, на основі певних критеріїв, таких як помилка представлення вхідних даних. Цей підхід дозволяє зберегти компактність і ефективність мережі, одночасно забезпечуючи високу точність представлення даних.

GWR включає ключові ідеї GNG, такі як конкурентне навчання і динамічне управління зв'язками між нейронами, але також вводить нові механізми для ефективнішого навчання:

1. Адаптивне додавання нейронів. Нові нейрони додаються лише тоді, коли вхідні дані не можуть бути адекватно представлені існуючими нейронами.

2. Контроль помилок. Акумуляція помилок для кожного нейрона дозволяє мережі виявляти області, які потребують додаткової уваги.

3. Видалення старих з'єднань. З'єднання між нейронами, які стають занадто старими, видаляються, що дозволяє мережі залишатися гнучкою та адаптивною.

Мережа складається з двох важливих компонентів – вузлів із пов'язаними з ними ваговими векторами та ребер, які з'єднують вузли, утворюючи сусідства вузлів, які представляють подібне сприйняття. Як вузли, так і ребра можна створювати та знищувати під час процесу навчання.

Техніка, яка використовується для створення та знищення меж мережі, є конкурентоспроможним методом навчання Гейбба [7, 8]. Для кожного входу генерується граничне з'єднання між вузлом, який найкраще відповідає одиниці, і другим найкраще відповідним блоком. Ці крайові з'єднання мають пов'язаний «вік». Спочатку встановлено значення нуль і збільшується на кожному кроці часу для кожного ребра, яке підключено до вузла-переможця. Єдиним винятком є межа, яка з'єднує найкращу та другу найкращі одиниці, вік яких скидається на нуль. Ребра, вік яких перевищує деяку постійну a_{max} , видаляються. Будь-який вузол, який не має сусідів, тобто не має гранич-

них з'єднань, видаляється, оскільки він є мертвим вузлом.

Нова частина алгоритму полягає в тому, як здійснюється процес вирощування. Замість того, щоб додавати новий вузол після кожного λ введення, як у мережі GNG, нові вузли можна додавати в будь-який час. Наприклад, кілька вузлів можна додавати один за одним, а потім більше не додавати протягом наступних ста ітерацій. Нові вузли розташовуються залежно від вхідних даних і поточного виграшного вузла, а не додаються там, де накопичена помилка найбільша, як в алгоритмі GNG [8].

Альтернативою використанню простого лічильника для запису частоти запуску кожного вузла є змінна, яка експоненціально зменшується від 1 до 0, щоб нові вузли мали значення 1, а вузли, які часто запускалися, були близькі до 0. Це еквівалентний лічильнику з верхньою межею, але має кілька переваг. Можна визнати той факт, що сусіди вузла-переможця також навчені, оскільки їхні змінні також можуть зменшуватися, хоча й у меншій мірі. Крім того, кількість разів, коли вузол спрацьовував, можна дуже легко врахувати в швидкості навчання, так що вузли, які часто спрацьовують, тренуються менше. Це усуває проблему, від якої часто страждають мережі, які постійно навчаються, ваги добре навчених вузлів продовжують злегка рухатися, так що мережа не зближується. Як і у більшості самоорганізованих мереж, налаштування швидкості навчання зазвичай базується на попередніх експериментах. Нарешті, це означає, що мережу GWR можна використовувати як фільтр новизни без будь-яких модифікацій: якщо вузол, який спрацьовує, раніше не спрацьовував або спрацьовував дуже рідко, тоді вхід є новим.

На рис. 1 зображено загальну схему нейронної мережі GWR. Нейронна мережа GWR складається з вхідного шару, шару кластеризації (CL) і вихідного нейрона. Кількість вхідних нейронів позначається N_i , вектор активацій вхідних нейронів \vec{l} , а кількість нейронів шару кластеризації – N_c . Кожен нейрон кластерного рівня с з'єднаний з усіма вхідними нейронами через вектор зважених адаптивних вхідних з'єднань \vec{w}_c розміру N_{w_c} . Крім того, нейрони CL можуть бути з'єднані один з одним незваженими зв'язками, утворюючи сусідства, де з'єднані нейрони CL представляють схожі характеристики. Вихід новизни дорівнює поточному зивкання переможного нейрона CL , $h_c \in (0; 1)$.

На кожному кроці часу активується задана кількість N_i вхідних нейронів. Вхідний рівень повністю підключений до рівня кластеризації (на рис. 1 для наочності зображено зв'язок усіх вхідних нейронів тільки з нейроном c_1). Зв'язки між нейронами CL визначають сусідства, де з'єднані нейрони представляють подібні входи. Кожен нейрон CL має показник зивкання, h_i , і показник зивкання нейрона-переможця представляє вихід мережі. Слід зауважити, що рис. 1 показує ситуацію, в якій вхідний вектор має довжину 3 і, отже, менший за кількість вхідних нейронів ($3 < N$). Решта вхідних нейронів активуються зі значенням 0. У протилежному випадку найбільш віддалені візуальні характеристики у сенсорному вхідному векторі будуть відкинуті.

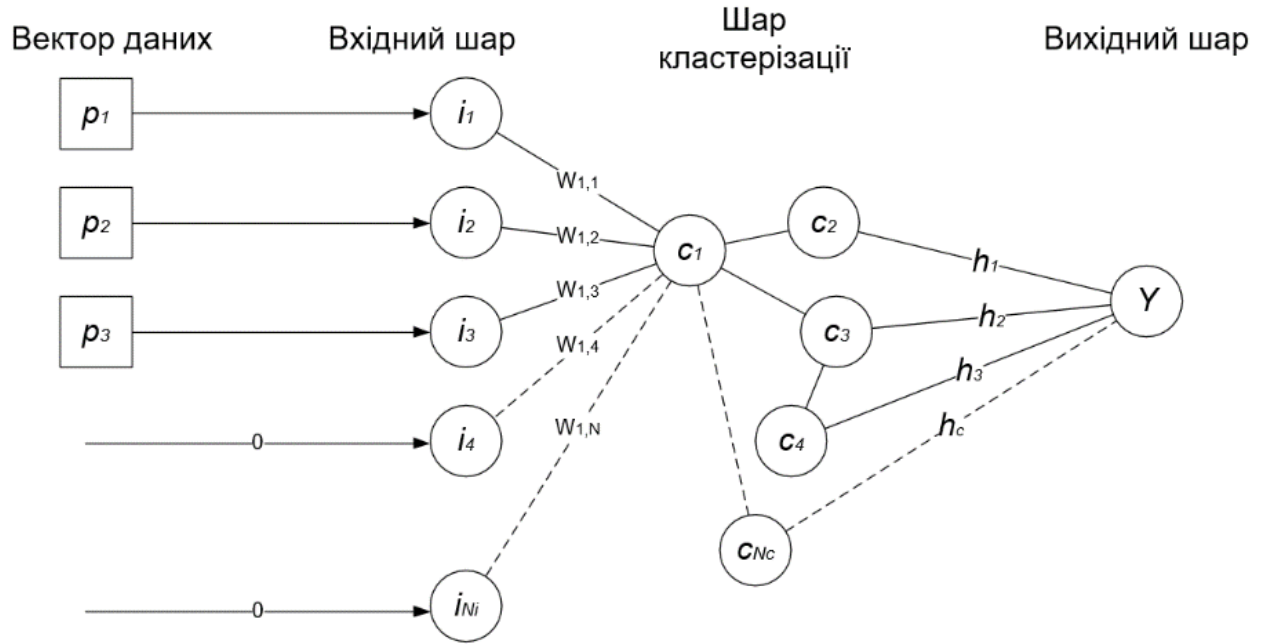


Рис. 1. Схема GWR

Розглянемо детально алгоритм роботи мережі GWR:

Крок 1. Ініціалізація структури мережі:

- Ініціалізувати вхідний шару розміром N_I .
- Ініціалізувати шар кластеризації (CL) двома нейронами (тобто $N_C = 2$).
- Встановити початкові ваги ($w_{j,c}$) зв'язків між вхідними нейронами та нейронами кластеризації в випадкові значення від 0 до 1.
- Встановити звання кожного нейрона кластеризації h_c на 1.

Крок 2. Активізація вхідного вектору:

- Отримати сенсорний вхідний вектор i розміром N_p (тобто кількість виявлених ознак).
- Регулювати активацію вхідних нейронів на основі розміру вхідного вектору:
 - Якщо $N_p < N_I$, встановити активацію перших N_p вхідних нейронів у значення вхідного вектора та решту $N_I - N_p$ нейронів у 0.
 - Якщо $N_p \geq N_I$, для кожного вхідного нейрона i встановити активацію нейрона i на i -те значення у вхідному векторі.

Крок 3. Знайти переможний нейрон:

- Обчислити відстань d_c кожного нейрона кластеризації c від вхідного вектора i :

$$d_c = \sqrt{\sum_{\{j=1\}}^{N_I=N_{Wc}} (i_j - w_{j,c})^2}.$$

- Вибрати нейрон s з найменшою відстанню d_s як вигравший нейрон $d_s = \min_{c \in N_C} d_c$.

Крок 4. Знайти другий за кращістю нейрон t аналогічним чином.

Крок 5. Якщо нейрони s і t не з'єднані, з'єднати їх, щоб утворити між ними зв'язок.

$$CL = CL \cup \{(s, t)\}.$$

Крок 6. Обчислити активацію a_s нейрона s :

$$a_s = \exp(-d_s).$$

Крок 7. Додати новий нейрон кластерного шару, r , якщо $a_s > \theta_s$ та $a_h < \theta_h$, де θ_s та θ_h є порогами активації та звання відповідно.

- Встановити ваги нового нейрона:

$$w_{jr} = (w_{js} + i_j)/2;$$

- Встановити звання нового нейрона:

$$h_r = 1;$$

• З'єднайте новий нейрон r із s і t . Видалити зв'язок сусідства між s і t .

Крок 8. Адаптувати ваги вхідних з'єднань нейрона s та всіх сусідніх нейронів n , до яких він підключений:

$$\Delta w_{j,s} = \eta \times h_s \times (i_j - w_{j,s});$$

$$\Delta w_{j,n} = \min\left(1, \frac{\psi a_n}{a_s}\right) \eta \times h_n \times (i_j - w_{j,n}),$$

де η - це коефіцієнт навчання мережі, а ψ - це коефіцієнт пропорційності ($0 < \psi < 1$).

Крок 9. Зістарити границі на кінці s

$$age_{(s,i)} = age_{(s,i)} + 1.$$

Крок 10. Зменшити звання нейрона s та його сусідів:

$$\Delta h_s = \frac{(\alpha(1 - h_s) - 1)}{\tau};$$

$$\Delta h_n = \frac{(\alpha(1 - h_n) - 1)}{\min\left(1, \frac{a_s}{\psi a_n}\right) \tau}$$

Крок 11. Перевірити, чи є якісь вузли або ребра для видалення, тобто чи є вузли, які більше не мають сусідів, або ребра, старші за найбільший дозволений вік. Видаляємо їх, якщо вони є.

Крок 12. Якщо доступні додаткові дані, повернутися до кроку 1 у випадку, якщо не досягнуто певного критерію зупинки.

Параметри мережі були встановлені як

$$\theta_H = 0.3, \eta = 0.3, \alpha = 1.05,$$

$$\tau = 3.33 \text{ та } \varphi = 0.1.$$

Параметри θ_A та N_{Wc} значно впливали на поведінку мережі, і різні архітектури мережі, таким чином, виникали в результаті різних комбінацій їхніх значень.

Цей алгоритм гарантує, що нейронна мережа GWR класифікує вхідні дані, динамічно зростає і адаптується до нової інформації та донавчатися без

втрати вже запам'ятованої раніше інформації при цьому додаючи нейрони тільки за необхідності.

Висновки

Таким чином, під час аналізу можливості застосування штучної нейронної мережі Growing When Required для виконання класифікації динамічних процесів були розглянуті її відмінності від нейронної мережі Growing Neural Gas, головні переваги і недоліки та описано структурні особливості мережі.

На основі проаналізованої інформації були створені структурна схема та детальний покроковий алгоритм роботи нейронної мережі GWR, який гарантує можливість її використання для класифікації повздовжніх та поперечних коливальних процесів.

Результати роботи створюють перспективи для подальших досліджень питання підвищення максимальної швидкості руху поїзда.

Отримані структурна схема та алгоритм будуть використані для програмної реалізації штучної нейронної мережі GWR.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Заковоротный А. Ю. Синтез автоматизированной системы управления подвижным составом на основе геометрической теории управления и нейронных сетей [Электронный ресурс] : дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.13.07 / Александр Юрьевич Заковоротный ; науч. консультант Дмитриенко В. Д. ; Нац. техн. ун-т "Харьков. политехн. ин-т". – Харьков, 2017. – 433 с. – Библиогр.: с. 326 – 358. – рус.
2. Deep convolutional neural networks for detection of rail surface defects / S. Faghih-Roohi, S. Hajizadeh, A. Núñez, R. Babuska, B. De Schutter // 2016 International joint conference on neural networks (IJCNN). IEEE. 2016. С. 2584–2589.
3. Carboni, M., Crivelli, D., 2020. An acoustic emission based structural health monitoring approach to damage development in solid railway axles. Int. J. Fatigue 139, 105753.
4. Lee, J.S., Hwang, S.H., Choi, I.Y., Kim, I.K., 2018. Prediction of track deterioration using maintenance data and machine learning schemes. J. Transp. Eng. A Syst. 144 (9), 04018045.
5. Khouzani, A.H.E., Golroo, A., Bagheri, M., 2017. Railway maintenance management using a stochastic geometrical degradation model. J. Transp. Eng. A Syst. 143 (1), 04016002.
6. Заковоротный А. Ю. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный / [монография]. – Харьков: Изд. центр «НТМТ», 2013. – 248 с.
7. Fritzke, B. (1995). A growing neural gas network learns topologies. In G. Tesauro, D. S. Touretzky, & T. K. Leen (Eds.), (pp. 625–632). Advances in Neural Information Processing Systems 7 (NIPS'94), Cambridge: MIT Press.
8. Marsland, S., Shapiro, J., & Nehmzow, U. (2002). A self-organising network that grows when required. Neural Networks, 15, 1041–1058.

Received (Надійшла) 13.08.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.10.2024

Development of a neural network structure for oscillation classification

Oleksandr Yevtushenko, Oleksandr Zakovorotnyi

Abstract. The paper examines today's urgent problem of increasing the maximum speed of railway transport, limitations and obstacles on the way to its solution and the possibility of overcoming these obstacles. The possibility of increasing the maximum speed of the train on those sections of the railway track, where it is permissible, was separately considered. To realize this possibility, the task of detecting, analyzing and classifying the vibrations that occur during train movement is relevant. A review of research devoted to the use of neural networks in related subject areas has been conducted. According to the results of the research analysis, it is proposed to use the Growing When Required (GWR) neural network – Growing Neural Gas modification to perform the task, which is optimal for performing the task of analyzing and classifying train oscillations and has the ability to learn more without damaging previously learned information. The structure of the GWR neural network has been developed. The algorithm of the GWR neural network is presented.

Keywords: artificial neural networks, Growing Neural Gas, GNG, Growing When Required, GWR, railway transport, analysis of train oscillations.

М. С. Кавецький, О. І. Федюшин, В. В. Просолов, В. О. Фроленко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

АНАЛІЗ БЛОКЧЕЙНІВ НА МОЖЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ ЗАСТОСУНКІВ

Анотація. Предметом дослідження є можливості блокчейн-платформ для розробки децентралізованих застосунків (DApps), з акцентом на продуктивність, масштабованість, розробку смарт-контрактів, екосистему, вартість транзакцій та відповідність регуляціям. **Завдання статті** полягає в аналізі платформ, визначенні їх сильних і слабких сторін та допомозі розробникам у виборі оптимальної технології для реалізації проєктів. **Висновки:** проведене дослідження показало, що блокчейни Aptos та Solana мають доволі непогані загальні характеристики для розробки більшості децентралізованих застосунків.

Ключові слова: блокчейн, Ethereum, Solana, Optimism, Tron, BNB, Avalanche, Polygon, Hedera, Aptos.

Вступ

Актуальність дослідження блокчейнів на можливості у розробці децентралізованих застосунків (DApps) обумовлена швидким розвитком технологій розподіленого реєстру та їх зростаючою популярністю у різних сферах, через що з'являється багато блокчейнів, серед яких складно обрати найкращий. Минулий рік був дуже сприятливий для криптовалют, де за даними Мінфіну [1] капіталізація ринку зростає з 795 млрд до поточних 1,55 трлн (+95%), багато ключових гравців вистояли під натиском регуляторів. За прогнозами [2], глобальний ринок блокчейну до 2030 року досягне вартості 1,431.54 мільярда доларів, зростаючи з середньорічним темпом (CAGR) приблизно 85.9% з 2022 по 2030 рік. Крім того, блокчейн може збільшити глобальний ВВП на 1.76 трильйона доларів до 2030 року [2]. Це свідчить про суттєвий вплив технології на економіку. Дослідження також показують, що 96% експертів у фінансових послугах вважають, що блокчейн досягнув масового впровадження [2]. У виробництві блокчейн зростає з темпом 73% між 2023 і 2026 роками [2]. Прозорість та відслідковувальність є головними факторами, що стимулюють впровадження блокчейну.

У світі, де безпека та прозорість даних стають пріоритетами, блокчейни пропонують унікальні рішення, які дозволяють створювати системи з високим рівнем захисту від втручання та шахрайства. Водночас, збільшення кількості користувачів та транзакцій вимагає від блокчейн-платформ не тільки стабільної роботи, але й високої продуктивності та масштабованості. Саме тому аналіз продуктивності, розробки смарт-контрактів, екосистеми, вартості транзакцій, інтероперабельності та відповідності регуляціям є вкрай важливим для розробників, які планують створювати DApps. Технологічні інновації, зокрема впровадження нових механізмів консенсусу та інструментів для розробки, суттєво впливають на спроможність блокчейнів задовольняти потреби сучасних застосунків. Оцінка цих аспектів дозволяє зрозуміти, які блокчейн-платформи є найбільш перспективними для розробки децентралізованих застосунків, що, в свою чергу, сприяє розвитку інноваційних рішень у різних галузях, включаючи фінанси, логістику, охорону здоров'я та багато інших.

Метою даної роботи є проведення детального аналізу можливостей різних блокчейн-платформ у контексті розробки децентралізованих застосунків. Це включає оцінку продуктивності та масштабованості, зручності розробки смарт-контрактів, екосистеми та підтримки, вартості транзакцій, інтероперабельності та відповідності регуляціям. Визначення сильних та слабких сторін кожної платформи допоможе розробникам обрати найбільш підходящу технологію для реалізації своїх проєктів, забезпечуючи тим самим їхню успішність та ефективність.

Виклад основного матеріалу

Блокчейн та децентралізовані застосунки

Блокчейн — це розподілена база даних або цифровий реєстр, який зберігає інформацію у вигляді блоків, зв'язаних між собою за допомогою криптографії [3]. Кожен блок містить певну кількість записів про транзакції та унікальний криптографічний геш попереднього блоку, що утворює ланцюжок блоків, або блокчейн. Ця структура забезпечує незмінність даних та захист від несанкціонованого втручання. Завдяки своїй децентралізованій природі, блокчейн не має центрального контролюючого органу — всі учасники мережі мають копію бази даних і разом підтверджують транзакції, що робить систему стійкою до атак і збоїв.

Blockchain був розроблений як відповідь на ці проблеми. Він впроваджує практику додавання блоків після кожної транзакції, які обмінюються всіма користувачами мережі і створюють розподілену, децентралізовану мережу [4].

Децентралізовані застосунки (DApps) — це програмні застосунки, що працюють на децентралізованих мережах, таких як блокчейн. Вони відрізняються від традиційних централізованих застосунків тим, що не мають єдиного центрального сервера або контролюючого органу. Замість цього, DApps використовують смарт-контракти — програмні протоколи, які автоматично виконують певні дії при виконанні визначених умов. Смарт-контракти розміщуються на блокчейні, що забезпечує прозорість, безпеку та незмінність виконання коду [4]. Це дозволяє створювати застосунки, що працюють безпосередньо між користувачами без посередників, знижуючи ризики шахрайства і покращуючи ефективність.

Важливою особливістю DApps є їхня архітектура, яка забезпечує більшу прозорість та стійкість до цензури порівняно зі звичайними веб-застосунками. Замість зберігання даних на централізованих серверах, як це робиться у веб2, DApps зберігають інформацію на блокчейні. Це дозволяє користувачам мати повний контроль над своїми даними та забезпечує їхню безпеку [5].

Також в даній області слід ввести поняття Веб2 та Веб3. Де Веб2 — це друга генерація Інтернету, яка зосереджена на централізованих сервісах та інтерактивності. Веб2 дозволяє користувачам створювати контент, взаємодіяти з іншими через соціальні мережі, блоги, та веб-застосунки. Основною характеристикою Веб2 є централізоване управління даними компаніями, які надають платформи для взаємодії. Веб3 — це наступне покоління інтернету, яке базується на децентралізованих технологіях, таких як блокчейн. Веб3 надає користувачам більший контроль над своїми даними, дозволяє створювати та використовувати децентралізовані застосунки (DApps) без посередників. Основними характеристиками Веб3 є прозорість, безпека та децентралізоване управління.

Відмінності між Веб2 та Веб3 є значущими і охоплюють кілька аспектів. У Веб2 моделі більшість застосунків залежать від централізованих серверів, що належать окремим компаніям. Ці компанії мають контроль над даними користувачів, можуть монетизувати їх і навіть обмежувати доступ до сервісів. Веб3, заснований на блокчейні та DApps, відмовляється від централізованого контролю, надаючи користувачам більше контролю над своїми даними та взаємодіями.

У Веб3 користувачі зберігають власні дані і можуть взаємодіяти з DApps без посередників. Це створює більш безпечне та приватне середовище, де дані користувачів захищені криптографією і розподілені по всій мережі. Прозорість смарт-контрактів дозволяє будь-кому переглядати логіку застосунків і бути впевненими в їх чесності та безпеці.

Таким чином, блокчейн та децентралізовані застосунки (DApps) є ключовими компонентами нової парадигми Веб3. Блокчейн забезпечує надійну та безпечну основу для зберігання даних і виконання транзакцій, тоді як DApps використовують цю інфраструктуру для створення інноваційних програмних рішень. Уявіть блокчейн як інфраструктуру, яка надає незмінні записи та безпеку, тоді як DApps є додатками, що працюють на цій інфраструктурі, надаючи користувачам різноманітні функції та сервіси без потреби у централізованому контролі. Це поєднання створює нові можливості для розробки програмних рішень, які є безпечними, прозорими та стійкими до цензури, відкриваючи шлях до більш децентралізованого інтернету та економіки.

Аналіз важливих елементів блокчейну для децентралізованих застосунків. Аналіз блокчейнів на можливості розробки децентралізованих застосунків (DApps) передбачає оцінку кількох ключових параметрів та властивостей різних блокчейн-платформ. Перший важливий аспект — продуктивність та

масштабованість. Тут варто звернути увагу на кількість транзакцій, які може обробити блокчейн за секунду (TPS), час підтвердження транзакції та механізм консенсусу. Наприклад, Proof of Work (PoW) відомий своєю високою безпекою, але повільною швидкістю, тоді як Proof of Stake (PoS) пропонує швидші транзакції з меншими енергозатратами. Важливо оцінювати, наскільки обрана платформа може впоратися з навантаженням великої кількості користувачів.

Другий аспект — розробка смарт-контрактів. Це включає мови програмування, які підтримує блокчейн, такі як Solidity для Ethereum або Rust для Solana. Також слід враховувати наявність засобів розробки та підтримки інструментів, таких як IDE, бібліотеки та фреймворки. Безпека смарт-контрактів є критично важливою, тому наявність інструментів для аудиту та виявлення вразливостей допомагає уникнути потенційних проблем.

Третій важливий аспект — екосистема та підтримка. Кількість активних розробників, які працюють з платформою, може значно вплинути на її розвиток та популярність.

Якість документації та наявність технічної підтримки забезпечують легкість у навчанні та використанні платформи. Активне ком'юніті, форуми та конференції сприяють обміну знаннями та підтримці розробників.

Вартість транзакцій також має велике значення. Комісії за транзакції можуть варіюватися в залежності від платформи та навантаження на мережу. Важливо враховувати вартість розгортання смарт-контрактів та обслуговування, оскільки це впливає на економічну ефективність проекту.

Інтероперабельність блокчейну — це здатність взаємодіяти з іншими блокчейнами та підтримка різних токенів.

Можливість міжланцюгових транзакцій розширює функціональність DApps та дозволяє інтеграцію з іншими системами.

Підтримка стандартів токенів, таких як ERC-20 або ERC-721, також важлива для розробки різноманітних застосунків.

Відповідність регуляціям є критичним аспектом, особливо в контексті зростаючої уваги з боку державних органів. Блокчейн-платформа повинна відповідати місцевим законам та регуляціям, щоб уникнути юридичних проблем. Приватність даних та механізми їх захисту також є важливими для багатьох застосунків, що потребують зберігання конфіденційної інформації.

Приклади популярних блокчейн-платформ для розробки DApps включають Ethereum, Solana, Polkadot та Binance Smart Chain (BSC). Кожна з цих платформ має свої особливості. Ethereum відомий своєю великою екосистемою та підтримкою смарт-контрактів на Solidity, хоча й має високі комісії. Solana пропонує високу швидкість та низькі комісії, що робить її привабливою для розробників. Polkadot забезпечує інтероперабельність між блокчейнами та можливість створення парачейнів. Binance Smart Chain відрізняється низькими комісіями та активною

спільнотою, що робить її популярною у сфері DeFi. Узагалі, при виборі блокчейн-платформи для розробки DApps необхідно враховувати специфічні потреби конкретного застосунку, такі як швидкість, безпека, вартість, підтримка розробників та можливість інтеграції з іншими системами.

Кожна платформа має свої переваги та недоліки, які потрібно ретельно аналізувати для досягнення найкращих результатів у розробці децентралізованих застосунків.

Порівняльний аналіз блокчейнів. Для порівняльного аналізу блокчейнів пропонується комплексно підійти до аналізу, та зробити порівняльний аналіз за різними показниками, включаючи показники швидкодії блокчейну, його поточний стан на ринку, інструменти для дослідника та ком'юніті розробників, а також самі характеристики блокчейну.

Наступна таблиця (табл. 1) була зібрана використовуючи відомості з ресурсу, який спеціалізується на аналітиці технічних метрик блокчейн платформ [6].

Таблиця 1 – Порівняння блокчейнів за параметром швидкодії

Назва	TPS на момент 21.07.2024	Максимальний отриманий TPS	Максимальний теоретичний TPS	Час блоку, сек	TTF	Модель управління
Ethereum	12.85	62.34	119	12.04	16 хв	Off-chain
Solana	777	7229	65000	0.45	12 сек	Off-chain
Optimism	6.6	67.41	714	2	16 хв	On-chain
Tron	70.47	236	2516	3	57 сек	On-chain
BNB Chain	31.66	1731	2222	3	7 сек	On-chain
Avalanche	2.47	92.74	357	2	0 сек	On-chain
Polygon	29.68	429	649	2.15	4 хв	Off-chain
Hedera	1821	3287	10000	2	7 сек	Council
Aptos	11.08	7480	160000	0.22	1 сек	On-chain

На основі наданої табл. 1, проведемо порівняльний аналіз блокчейнів для розробки децентралізованих застосунків (dApps). Розглянемо кожен параметр окремо та зробимо висновки щодо найкращих і найгірших блокчейнів.

Почнемо з параметра TPS на момент написання статті 21.07.2024. Найкращий показник має блокчейн Hedera з 1821 транзакцією за секунду (TPS). Це значно перевищує показники інших блокчейнів. Найгіршим у цьому показнику є Avalanche з лише 2.47 TPS, що свідчить про значно меншу пропускну здатність.

При аналізі максимального отриманого TPS, Aptos виявляється лідером із 7480 TPS, демонструючи значні можливості під час пікових навантажень. На іншому кінці спектра знаходиться Ethereum з 63.34 TPS, що є найменшим показником серед усіх блокчейнів.

Максимальний теоретичний TPS розкриває потенційні можливості блокчейнів. Aptos виділяється з колосальними 160000 TPS, що робить його найкращим у цій категорії. Ethereum, з іншого боку, має найменший теоретичний максимум у 119 TPS, що обмежує його потенційну масштабованість.

Час блоку також є важливим показником. Aptos має найменший час блоку — 0.22 секунди, що забезпечує швидку обробку транзакцій. Найбільший час блоку, 12.04 секунди, має Ethereum, що може стати перешкодою для швидких транзакцій.

TTF (Time to Finality) є ще одним важливим параметром. Avalanche показує найкращий результат із нульовим часом до фінальної транзакції, що означає миттєве підтвердження. Найгірший показник у Ethereum та Optimism, де TTF становить по

16 хвилин. Модель управління може бути суб'єктивним параметром і залежить від вимог до управління конкретного проекту. Деякі блокчейни використовують on-chain моделі (Ethereum, Optimism, Tron, BNB Chain, Avalanche, Aptos), деякі off-chain (Solana, Polygon), а Hedera використовує модель Council.

Згідно з проведеним порівняльним аналізом блокчейнів для розробки децентралізованих застосунків (dApps), найкращим блокчейном у більшості параметрів виявився Aptos. Він демонструє високі показники як максимального отриманого TPS (7480 TPS), так і теоретичного максимуму (160000 TPS), а також має найменший час блоку — лише 0.22 секунди. Ці характеристики роблять його надзвичайно потужним і масштабованим рішенням для швидкої та ефективної обробки транзакцій.

З іншого боку, Ethereum показав найгірші результати у кількох важливих категоріях, таких як максимальний отриманий TPS (63.34 TPS), теоретичний максимум (119 TPS) і час блоку (12.04 секунди). Варто зазначити, що в аналізі використовувався блокчейн Ethereum з Proof of Work (PoW), що значно обмежує його продуктивність і масштабованість порівняно з новішими блокчейнами.

Отже, Aptos є найкращим вибором для розробників децентралізованих застосунків завдяки своїм високим показникам пропускну здатності та швидкості обробки транзакцій. Це робить його ідеальним для проектів, які потребують швидкої обробки та великої кількості транзакцій.

В табл. 2 показано поточний стан цих блокчейнів на ринку. Дані були зібрані на момент 21.07.2024, а також показано їх зміну за останні 30 днів. Дані було взято з сервісу DappRadar [7].

Таблиця 2 – Порівняння блокчейнів за поточною ситуацією на ринку

Назва	Ціна токену	К-сть Dapps	Контракти	Загальне UAW	DeFi TVL	NFT об'єм	Транзакції	Dapps об'єм
Ethereum	\$3.52k -0.01%	4,710 +28	179.67k	1.82M -15.61%	\$65.97B -18.86%	\$219.23M -52.9%	6.87M -30.36%	\$220.71B +10.07%
Solana	\$173.84 +29.94%	302 +9	1.85k	9.97M +9.15%	\$1.52B +23.38%	\$51.1M -4.28%	470.54M +78.11%	\$3.91B -14.91%
Optimism	\$1.93 +3.76%	288 +5	4.9k	998.98k -7.06%	\$304.94M -34.54%	-	1.94M -4.01%	\$7.06B +8.23%
Tron	\$0.134 +15.31%	1,386 +1	25.68k	54.27k +6.41%	-	\$3.89k +11,097.77%	414.19k +9.97%	\$1.11B +22.85%
BNB Chain	\$597.25 +0.88%	5,433 +30	81.56k	3.06M -26.28%	\$2.98B -13.07%	\$214.93k -65.27%	18.33M -17.52%	\$18.53B -25.72%
Avalanche	\$28.79 +3.94%	611 +9	4.3k	129.22k -0.32%	\$620.17M +13.96%	\$110.22k -32.78%	697.1k -7.73%	\$750.78M +0.78%
Polygon	\$0.54 -6.8%	2,209 +32	101.98k	8.08M -1.44%	\$614.41M -37.54%	\$133.34M +73.19%	55.37M -5.53%	\$6.3B -17.55%
Hedera	\$0.0746 -8.36%	29 0	176	6.71k -38.43%	\$7.59M -6.05%	\$73.92k -75.08%	185.18k -26.23%	\$79.3M -37.95%
Aptos	\$7.42 +6.46%	34 +4	57	2.19M -9.58%	\$419.17M +22.83%	-	13.72M -85.67%	\$1.02B +18.12%

З табл. 2 видно, що Ethereum має найвищу ціну токену серед усіх блокчейнів, досягаючи \$3.52k, хоч це і на 0.01% менше порівняно з попереднім місяцем. Це свідчить про високу ринкову вартість та стабільність Ethereum. З іншого боку, найнижчу ціну токену має Hedera – \$0.0746, що також зменшилося на 8.36%, вказуючи на менший ринок або більшу доступність. Токен блокчейну Solana має непогану тенденцію росту.

Щодо кількості децентралізованих додатків (Dapps), BNB Chain лідирує з 5,433 Dapps, збільшившись на 30 за останні 30 днів. Це свідчить про велику популярність платформи серед розробників. Водночас, Hedera має лише 29 Dapps, і їх кількість залишилась незмінною, що може вказувати на новизну або меншу активність платформи.

Ethereum також має найбільшу кількість контрактів – 179.67k, що вказує на активне використання платформи для створення смарт контрактів. Aptos, з іншого боку, має найменшу кількість контрактів – 57, що вказує на меншу активність або новизну платформи.

Серед активних користувачів найбільше виділяється Solana з 9.97 мільйонами, збільшившись на 9.15% за останні 30 днів. Це свідчить про популярність платформи серед користувачів, а також можна бачити гарні перспективи розвитку. Hedera, навпаки, має найменшу кількість активних користувачів – 7.61k, зменшившись на 38.43%, що вказує на низьку активність.

Ethereum також лідирує у сфері DeFi із загальною заблокованою вартістю (TVL) у розмірі \$65.97B, хоч це і на 18.86% менше порівняно з попереднім місяцем. Це свідчить про значну кількість коштів, заблокованих у децентралізованих фінансових додатках.

Hedera має найнижчу заблоковану вартість – \$5.75M, що зменшилась на 60.65%, вказуючи на низьку активність у сфері DeFi. Для Tron дані щодо TVL відсутні.

Обсяг NFT на Ethereum є найвищим і становить \$219.23M, хоча зменшився на 52.9%. Це свідчить про активний ринок NFT на цій платформі. Найнижчий обсяг NFT на Tron – \$3.89k, але варто відзначити, що цей показник зріс на 1,197.77% за останні 30 днів.

Solana має найбільшу кількість транзакцій – 470.54 мільйони, що вказує на велику кількість операцій на платформі, збільшившись на 78.11%. Найменшу кількість транзакцій має Hedera – 26.3k, зменшившись на 85.67%, що вказує на низьку активність.

Найбільший обсяг децентралізованих додатків (Dapps) спостерігається на Ethereum – \$220.71B, збільшившись на 10.07%. Це свідчить про велику активність та використання платформи. Найнижчий обсяг Dapps у Hedera – \$12.8M, що зменшився на 37.95%, вказуючи на низьку активність.

З табл. 3 бачимо, що всі блокчейни підтримують щонайменше одну мову для програмування смарт контрактів для розробки децентралізованих застосунків. Ethereum використовує Solidity та Vyper, Solana - Rust, C, C++, а інші блокчейни переважно використовують Solidity. Hedera виділяється використанням Java та JavaScript.

Лідером по кількості зірок на гітхабі є Ethereum з 46.8 тис зірок, а Solana наздоганяє його з 12.7 тис, але все ще далеко. Optimism, який є Layer 2 рішенням для Ethereum, має 5.5 тис зірок, що показує зростаючий інтерес до масштабування Ethereum.

Кількість форків також найбільша у Ethereum (19.8 тис). Співвідношення відкритих та вирішених проблем у Ethereum доволі непогане (276 відкритих та 7771 вирішених).

Таблиця 3 – Порівняння блокчейнів за параметром швидкодії

Назва	Ім'я пакету GitHub	Мова розробки смарт-контрактів	Кількість GitHub зірок	Кількість GitHub форків	Відкриті/ вирішені GitHub проблеми (issues)	Останній коміт, (різниця часу)
Ethereum	github.com/ethereum/go-ethereum	Solidity, Vyper	46.8 тис	19.8 тис	276 / 7771	18.07.2024 (3 дні)
Solana	github.com/solana-labs/solana	Rust, C, C++	12.7 тис	4 тис	379 / 4994	22.03.2024 (4 місяці)
Optimism	github.com/ethereum-optimism/optimism	Solidity	5.5 тис	3 тис	139 / 995	19.07.2024 (2 дні)
Tron	github.com/tronprotocol/java-tron	Solidity	3.7 тис	1.4 тис	17 / 1441	08.07.2024 (2 тижні)
BNB Chain	github.com/bnb-chain/bsc	Solidity	2.6 тис	1.5 тис	13 / 1261	17.07.2024 (4 дні)
Avalanche	github.com/ava-labs/avalanchego	Solidity, Go	2.1 тис	652	135 / 628	19.07.2024 (2 дні)
Polygon	github.com/maticnetwork/haimdall	Solidity	251	176	2 / 324	05.06.2024 (більше місяця)
Hedera	github.com/hashgraph/hedera-sdk-java	Solidity, Java, JavaScript	203	113	55 / 597	18.07.2024 (3 дні)
Aptos	github.com/aptos-labs/aptos-core	Move	6 тис	3.6 тис	463 / 1722	20.07.2024 (вчора)

Polygon має найменшу кількість відкритих issues (2) відносно загальної кількості вирішених (324), що може свідчити про ефективне вирішення проблем.

Цікаво, що Aptos, незважаючи на відносно невелику кількість зірок (6 тис), має найбільшу кількість відкритих issues (463), що може вказувати на активну розробку та залучення спільноти.

З огляду на дату останнього коміту (18.07.2024) та інших описаних вище показників можна сказати, що у Ethereum найкраща активність на гітхабі, що свідчить про те, що проект розвивається досить непогано. Дати останніх комітів для більшості проектів досить свіжі (липень 2024), що вказує на активний розвиток.

Інші блокчейни не такі популярні, але на другому місці стоїть перспективна Solana, яка може ще себе показати, бо показувала непоганий приріст по основним показникам з характеристик в табл. 4.

Аналізуючи технології різних блокчейн-платформ, можна виокремити ті, які пропонують найвищий рівень захисту, а також виявити ті, що мають певні ризики.

Aptos вирізняється серед інших завдяки використанню мови програмування Move, яка була спеціально розроблена для зменшення ймовірності помилок у смарт-контрактах. Цей підхід значно знижує ризики, пов'язані з безпекою, що робить Aptos однією з найнадійніших платформ. Додатково, механізм консенсусу Proof of Stake (PoS) забезпечує високий рівень децентралізації, що ускладнює централізовані атаки на мережу. Але дана система нова та не пройшла перевірку часом.

Ethereum також демонструє високий рівень безпеки завдяки своїй розвиненій екосистемі аудиту смарт-контрактів. Вона є однією з найбільш зрілих у блокчейн-світі, що зменшує вразливість мережі до атак. Крім того, завдяки довгій історії розвитку та широкій підтримці спільноти, Ethereum швидко виявляє та виправляє потенційні уразливості.

Hedera виділяється своїм унікальним механізмом консенсусу Hashgraph, який забезпечує високий рівень безпеки завдяки швидкій обробці транзакцій і стійкості до атак. Високий рівень децентралізації, що досягається через управління мережею Консультативною радою, також сприяє підвищенню безпеки та запобіганню централізованим атакам.

На противагу цьому, Tron має певні ризики через низький рівень децентралізації, що є наслідком використання механізму Delegated Proof of Stake (DPoS).

Такий підхід забезпечує управління мережею невеликою кількістю валідаторів, що підвищує ризик централізації та можливість зловживань. Крім того, відомі випадки атак на смарт-контракти та DDoS-атаки свідчать про наявність вразливостей у цій мережі.

BNB Chain також демонструє середній рівень безпеки через схожі проблеми з децентралізацією, використовуючи механізм DPoS. Незважаючи на наявність сильної екосистеми аудиту, мережа пережила кілька хардфорків, що свідчить про можливість виникнення критичних помилок у її роботі.

Solana, хоч і є потужною платформою, також має певні ризики через свою схильність до перевантаження мережі.

Таблиця 4 – Порівняння безпеки блокчейнів

Аспект безпеки	Aptos	Ethereum	Solana	Optimism	Tron	BNB Chain	Avalanche	Polygon	Hedera
Механізм консенсусу	Proof of Stake (PoS)	Proof of Stake (PoS) (після The Merge)	Proof of History (PoH) + PoS	Optimistic Rollup	Delegated Proof of Stake (DPoS)	Delegated Proof of Stake (DPoS)	Proof of Stake (PoS)	Proof of Stake (PoS)	Hashgraph
Рівень децентралізації	Високий	Високий	Середній	Середній	Низький	Середній	Високий	Середній	Високий
Модель управління	Управління власниками токенів	Управління через DAO і власників токенів	Управління валідаторами	Управління через DAO	Управління валідаторами	Управління валідаторами	Управління власниками токенів	Управління через DAO	Управління через Консультативну раду
Історія оновлень та форків	Нова мережа, поки що без форків	Значна історія, багато форків	Перевантаження мережі, інциденти з атаками	Мала історія форків	Хардфорики за необхідності	Декілька хардфорків	Історія форків	Декілька хардфорків	Без форків (протокол Hashgraph)
Аудит смарт-контрактів	Забезпечений через Move	Потужна екосистема аудиту	Потужна екосистема аудиту	Використовує Solidity, підтримка аудиту	Потужна екосистема аудиту	Потужна екосистема аудиту	Підтримка аудиту смарт-контрактів	Потужна екосистема аудиту	Підтримка аудиту смарт-контрактів
Відомі атаки	Поки що немає	DAO Hack, Poly Network Hack	Перевантаження мережі	Поки що немає	Уразливості смарт-контрактів, DDoS атаки	Уразливості смарт-контрактів	Уразливості в DeFi	Експлойти в смарт-контрактах	Поки що немає
Протоколи безпеки	Високий рівень, Move мінімізує помилки	Високий рівень, багато рішень	Середній рівень, робота з перевантаженням	Оптимізований для масштабування	Середній рівень, захист від DDoS	Середній рівень, захист від DDoS	Високий рівень захисту	Високий рівень захисту	Високий рівень захисту
Регуляторні аспекти	Відносно новий, вплив мінімальний	Підвищена увага регуляторів	Підвищена увага регуляторів	В процесі адаптації	Підлягає регуляції	Регулятори слідкують за діяльністю	Активний контроль регуляторів	Активний контроль регуляторів	Впливає на законодавчі рішення

Це може впливати на загальну безпеку та робити мережу більш вразливою до атак. Додатково, середній рівень децентралізації та обмежене управління мережею викликають занепокоєння щодо безпеки цієї платформи.

Таким чином, платформи, такі як Aptos, Ethereum та Hedera, є найбільш безпечними завдяки своїм інноваційним технологіям, високому рівню децентралізації та надійним механізмам консенсусу.

Водночас, Tron, BNB Chain і Solana мають певні ризики, пов'язані з централізацією та історією вразливостей, що робить їх менш стійкими до потенційних атак.

Висновки

У висновку можна зазначити, що проведений аналіз можливостей різних блокчейн-платформ для розробки децентралізованих застосунків (DApps)

підтверджує, що вибір платформи залежить від специфічних вимог і цілей проекту.

Кожна з розглянутих платформ має свої унікальні переваги та недоліки.

На основі проведеного аналізу можна виділити два блокчейни, які демонструють найкращі показники: Aptos та Solana. Aptos вражає своїми характеристиками, маючи найвищий максимальний отриманий TPS у 7480 та теоретичний максимум у 160000 TPS, а також найменший час блоку - всього 0.22 секунди. Solana не відстає, показуючи високий поточний TPS у 777, максимальний отриманий TPS у 7229 та другий найвищий теоретичний максимум у 65000 TPS.

Крім того, Solana має дуже малий час блоку в 0.45 секунди та швидкий час до фінальності (TTF) у 12 секунд. Обидва блокчейни демонструють відмінну продуктивність та масштабованість, що робить

їх найперспективнішими для розробки децентралізованих застосунків. На противагу цьому, Ethereum у версії Proof of Work виявляється найгіршим серед порівнюваних блокчейнів. Він має низький поточний TPS у 12.85, найнижчий максимальний отриманий TPS у 62.34 та теоретичний максимум лише у 119 TPS. Крім того, Ethereum має найбільший час блоку в 12.04 секунди та найдовший TTF у 16 хвилин. Такі показники суттєво обмежують ефективність Ethereum для сучасних децентралізованих застосунків, особливо порівняно з більш продуктивними альтернативами.

Щодо даних по поточній ситуації на ринку, то Ethereum залишається лідером ринку за багатьма ключовими показниками. Він має найвищу ціну токена, найбільшу кількість смарт-контрактів, найвищий показник TVL у DeFi секторі та найбільший обсяг NFT. Це свідчить про високу довіру інвесторів, активне використання платформи розробниками та значну популярність у DeFi та NFT сегментах. Solana демонструє вражаючий прогрес, маючи найбільшу кількість активних користувачів та транзакцій, а також показуючи значне зростання в цих категоріях. Це вказує на зростаючу популярність платформи та її потенціал стати серйозним конкурентом Ethereum. BNB Chain лідирує за кількістю децентралізованих додатків, що свідчить про її популярність серед розробників. Aptos, незважаючи на свої технічні переваги, поки що має невелику кількість контрактів, що може вказувати на ранню стадію розвитку екосистеми. Hedera демонструє найнижчі показники в багатьох категоріях, включаючи ціну токена, кількість Dapps, активних користувачів, TVL у DeFi та обсяг

Dapps. Це може свідчити про те, що платформа все ще знаходиться на ранній стадії розвитку або стикається з труднощами в залученні користувачів та розробників.

Щодо ситуації з ком'юніті, то Ethereum лідирує за розміром та активністю спільноти розробників, маючи найбільшу кількість зірок і форків на GitHub, а також підтримуючи кілька мов програмування. Solana посідає друге місце за популярністю серед розробників, демонструючи зростаючий інтерес. Aptos показує високу активність розробки, незважаючи на меншу кількість зірок. Optimism привертає увагу як перспективне рішення для масштабування Ethereum. Polygon відзначається ефективним вирішенням проблем. Більшість проектів демонструють активний розвиток, про що свідчать свіжі дати останніх комітів. Загалом, хоча Ethereum залишається лідером, інші блокчейни, особливо Solana та Aptos, показують значний потенціал росту та активне залучення розробників, що свідчить про здорову конкуренцію в екосистемі.

Щодо ситуації з безпекою, то можна сказати, що блокчейни Aptos, Ethereum та Hedera, є найбільш безпечними завдяки своїм інноваційним технологіям, високому рівню децентралізації та надійним механізмам консенсусу. Водночас, Tron, BNB Chain і Solana мають певні ризики, пов'язані з централізацією та історією вразливостей, що робить їх менш стійкими до потенційних атак.

У підсумку, блокчейн Ethereum показує непогані результати, але по динаміці росту Solana має всі шанси вирватися вперед та стати новим лідером у сфері розробки децентралізованих застосунків.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Що буде з криптовалютою у 2024 році [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://minfin.com.ua/ua/crypto/articles/vid-nulya-do-milyona-yaki-z-navguchnishih-prognoziv-pro-kriptu-mozhut-zbutisya-vzhe-u-2024-roci/>
2. 19 Must-know blockchain statistics [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://findstack.com/resources/blockchain-statistics>
3. Guo, H., & Yu, X. (2022). A survey on blockchain technology and its security. *Blockchain: research and applications*, 3(2), 100067
4. Mohammed, A. H., Abdulateef, A. A., Abdulateef, I. A. (2021, June). Hyperledger, Ethereum and blockchain technology: a short overview. In 2021 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA) (pp. 1-6). IEEE.
5. Garg, Aakash & Tyagi, Ankit & Patel, Anant & Raj, Divyansh. (2023). *Blockchain and Decentralized Apps*.
6. TPS dashboard [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://chainspect.app/dashboard>
7. Top blockchains [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dappradar.com/rankings/chains>

Received (Надійшла) 14.05.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.08.2024

Analysis of blockchains for the development of decentralized applications

M. Kavetskyi, O. Fedyushyn, V. Prosolov, V. Frolenko

Abstract. The goal of this work is to conduct a detailed analysis of the capabilities of various blockchain platforms in the context of developing decentralized applications. The study covers the evaluation of key aspects such as performance, scalability, ease of smart contract development, ecosystem and support, transaction costs, interoperability, and regulatory compliance. Identifying the strengths and weaknesses of each platform aims to help developers choose the most suitable technology for their projects, ensuring their success and efficiency in the dynamic world of blockchain technologies. The article will be useful for researchers and developers of decentralized applications who need to build fast and reliable blockchain-based systems.

Keywords: blockchain, Ethereum, Solana, Optimism, Tron, BNB, Avalanche, Polygon, Hedera, Aptos.

A. Kapiton¹, D. Tyshchenko², A. Desiatko², V. Lazorenko²

¹ National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

² State University of Trade and Economics, Kiev, Ukraine

EVOLUTION AND DISTRIBUTION ANALYSIS OF MULTIMODAL ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS

Abstract. The article considers the main aspects of evolution and performs a thorough analysis of the stages of formation of multimodal artificial intelligence systems (AIS). It was determined that in modern realities, artificial intelligence has undergone a transformational shift towards embracing multimodality in large language models. Modern approaches and ways of improving large language models by means of processing and generating a large amount of data are analyzed. The stages of transformation of artificial intelligence in the direction of multimodality of innovative development in large language models have been studied. The issue of verification and interaction of information systems with the surrounding world is considered. It was determined that they are inherently multimodal, multicomponent. Ways of improving large language models with the help of the ability to process and generate different data modalities are analyzed. It has been investigated that modern multimodal artificial intelligence systems are effectively used in various fields of science, education, and economics and require further development and improvement. It was determined that due to the rapid development of information technologies and systems in various spectrums of life, AI is experiencing a rapid modification, where generative models, which are becoming more and more perfect, deserve special attention. An overview of the architecture of the AnyGPT model is performed, where modalities are tokenized into discrete tokens, on the basis of which LLM performs multimodal perception and generation in autoregression. The methodology underlying AnyGPT was found to be multi-component, with the model demonstrating capabilities on par with specialized models in all assessment modalities tested. It has been established that tools designed to detect objects generated by artificial intelligence are in a state of development and are constantly being modified.

Keywords: artificial intelligence, bioengineering, generative models, multimodality.

Introduction

Artificial intelligence has undergone a transformational shift towards embracing multimodality in large language models (LLMs), which has ushered in a new way of looking at how machines perceive and interact with the world around them. This evolution stems from the recognition that human experience is inherently multimodal, encompassing not only text but also speech, images, and music. Hence, enhancing large language models with the ability to process and generate different data modalities holds great promise for increasing their utility and applicability in real-world scenarios. Information technologies and systems play an increasingly important role in today's world. Their influence is felt in all spheres of life, from economy and education to science and transport. Information technologies and systems not only make our work more efficient, but also open up new opportunities for development and innovation. The purpose of this study is to analyze the impact of information technologies and systems on the economy, education, science and transport, identification of key problems and challenges related to the development of these technologies and systems.

Analysis of recent research and publications. The problem of analyzing the evolution of the development of artificial intelligence in the direction of multimodality and transformational development in large language models (llm) has always been in the scientific focus of leading foreign and domestic scientists. It was the study of verification and interaction of information systems with the surrounding world that caused, according to scientists, this evolution of views regarding the perception of certain results that are inherently

multimodal and multicomponent. Analysis of the improvement of llm with the help of the ability to process and generate different data modalities in the field of view of a number of foreign scientists. C. Wang, S. Chen, Y. Wu, Z. Zhang, L. Zhou, S. Liu, Z. Chen, Y. Liu, H. Wang, J. Li, L.He, S. Zhao, F. Wei, Z.Tang, Z. Yang, M. Khademi, Y. Liu, C. Zhu, and M. Bansal consider the issue of language models of neural codecs [1, 2].

Y. Wang, Y. Kordi, S. Mishra, A. Liu, N. Smith, D. Khashabi, and H. Hajishirzi investigate the problems of self-learning from the point of view of matching the LLMs with self-created instructions [3].

Sh. Wu, H. Fei, L. Qu, W. Ji, and Tat-Seng Chua They study the main advantages and disadvantages of multimodal Next-gpt [4].

T. Zhang, Y. Wu, T. Berg-Kirkpatrick, K. Chen, Y. Hui and S. Dubnov consider the features of large-scale contrastive pre-learning of speech and audio with feature fusion and keyword addition to captions [5].

N. Zeghidour, A. Luebs, A. Omran, J. Skoglund, and M. Tagliasacchi explore the features of Soundstream through the lens of an end-to-end neural audio codec [6].

D. Tyshchenko, T. Franchuk, R. Zakharov, V. Moskalenko in their works explore the design of key information management protocols using multimodal AI [7].

According to domestic scientists, one of the main tasks in this dynamic field is the design and development of models capable of seamlessly integrating and processing various types of data. It is the analysis of the creation of dual-modal models that combine different forms of data that is devoted to the works of O. Sukhorebrogo, D. Nenysh, A. Kurilekh [8, 9]. Practical applications of the integration of artificial intelligence are investigated by S. Gladkyi, M. Prorok [10].

Main part

AI became the fastest service to reach one hundred million monthly active users. According to PwC's 2023 Emerging Technology Survey, more than fifty four percent of surveyed companies integrated generative AI into their business processes during the year. They was

practiced by Blackrock Neurotech, Precision Neuroscience and many others. but Neuralink's main difference is its focus on expanding human capabilities, not just restoring lost ones. The analysis of scientists' research on the main characteristics of multimodal AI technologies made it possible to highlight the key ones are presented on Fig. 1 [11–20].

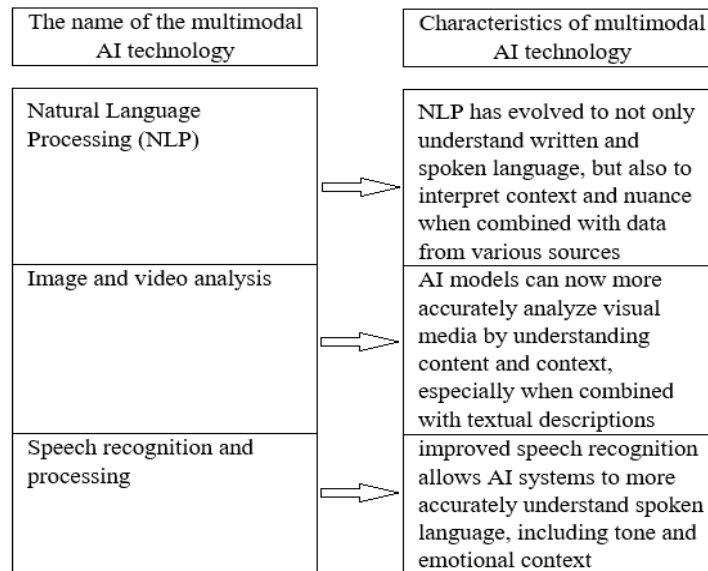


Fig. 1. Key technologies of multimodal AI

Information technologies and systems are rapidly developing, having a significant impact on all spheres of life. AI is experiencing explosive growth, with generative models becoming increasingly sophisticated. Mobile communication is evolving to provide access to communication anywhere in the world. Bioengineering is taking significant steps forward in exploring the possibilities of the brain-computer interface. In our opinion, the best tools for recognizing artificial intelligence AI are presented on Fig. 2 [17–20].

Tools designed to detect AI-generated images are mostly still in a state of development, evolving along with technological advances. The rapid pace of change in the field of AI is impressive, as significant advances are made almost every day. As more AI tools become available, the more they increase our efficiency, and this momentum of progress is expected to accelerate even further.

AnyGPT's performance underscores the efficiency of its design. Thanks to the rapid development of generative AI, creating convincing fake content has become much easier and more accessible. AI-based image generators and deepfaking technology are used for a wide range of purposes, from students to cheat on tests to fraudsters spreading disinformation about wars, elections and natural disasters.

Researchers have identified several approaches to multimodality, a brief description of which is presented are presented on Fig. 3.

This indicates a significant growth of AI in last year. The most famous of them is Google, which announced a competitor to ChatGPT Bard. In April, thanks to the merger of Google Research and DeepMind teams, they are creating methods to improve the

effectiveness of reinforcement learning. Such systems are able to perform extremely complex tasks through thousands of training iterations. In last year, Sundar Pichai, CEO of Google, together with Demis Hassabis of Google DeepMind presented Gemini, a multimodal AI that not only has the ability to understand text or images, but also combines different types of information in a way that is much closer to how humans perceive AI and other IT giants such as Microsoft Bing were also presented (renamed COPILOT in two thousand twenty-four year), Meta announces its open source LLM model, Anthropic releases Claude 2 and receives investment from Amazon. Working with the above systems on mobile devices requires a stable, fast and accessible connection.

This is precisely what can be used to show all possible combinations of high-resolution image synthesis, which helps to work on a whole series of different sets of solutions to the assigned problems. Usually, to create a given image, a special colab is used. In particular, Google Colab is a free service that presents everything you need for machine learning, divided into many separate cells.

Conclusions

The development of neural networks is a multi-component system, where each subsequent component is connected with the previous one, being its basis. First, language models appeared, tailored to work with text, and then, layer by layer, other modalities began to be added, such as photos, video and audio. Therefore, the primary source and basis of the research currently being conducted concerns multimodal AI, which is directly related to classical text neural networks.

AI identification tool	Characteristics of AI identification tool
Winston AI	the tool determines if the image was created by artificial intelligence, the results include image information such as C2PA, IPTC and Exif data
Illuminary	a tool for verifying the origin of an image on the Internet, provides an estimate of the likelihood of the involvement of artificial intelligence
Hive Moderation	an AI detection tool, specifically for detecting AI in images and videos, provides API services for processing and tagging images, videos, GIFs, web pages, audio, and live streams for content moderation
Is It AI?	a tool designed to identify an image or text generated by artificial intelligence offers a free version for basic use with the option to subscribe to additional features or integrate it into your AI content review platform
Originality.ai	offers AI text recognition services for writers, marketers and publishers, has three modes – Lite, Standard and Turbo
GPTZero	AI text detector for teachers, writers, cyber security professionals and recruiters
Copyleaks	copyleaks' AI text detector is designed to detect human writing patterns and flags content as potentially AI only when it detects deviations from these patterns

Fig. 2. The tools for recognizing artificial intelligence

Method	Characteristics of the method
Tool-augmented LLM	combines several independent models in one product
End-to-end multimodal LLM	instead of using separate models for text and images, such a model is trained on all necessary types of data at once, within a single structure
Modality bridging with pretrained models	eliminating the gap between modalities, combining them, where models exchange data through't a text request, but using mathematical vectors

Fig. 3. Characteristics of approaches to multimodality

Separately, it is necessary to look at the problems of large multimodal models: inclusion of more data modalities; availability of diverse data sets; generation of multimodal outputs; list of instructions (LLMs face the challenge of mastering dialogue and following instructions beyond simple completion); multimodal reasoning (seamless

integration of multimodal data for complex reasoning tasks); LMM compression (the resource-intensive nature of LMMs is a major obstacle, making them impractical for compute-constrained peripherals). Compressing LMMs to improve efficiency and make them deployable on resource-constrained devices is a critical area of current research.

REFERENCES

- Chengyi Wang, Sanyuan Chen, Yu Wu, Zi-Hua Zhang, Long Zhou, Shujie Liu, Zhuo Chen, Yanqing Liu, Huaming Wang, Jinyu Li, Lei He, Sheng Zhao, and Furu Wei. Neural codec language models are zero-shot text to speech synthesizers. ArXiv preprint, abs/2301.02111, 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2301.02111>.
- Zineng Tang, Ziyi Yang, Mahmoud Khademi, Yang Liu, Chenguang Zhu, and Mohit Bansal. Codi-2: In-context, interleaved, and interactive any-to-any generation. ArXiv preprint, abs/2311.18775, 2023a. URL: <https://arxiv.org/abs/2311.18775>.
- Y. Wang, Y. Kordi, S. Mishra, A. Liu, N. A. Smith, D. Khashabi, and H. Hajishirzi. Self-instruct: Aligning language model with self generated instructions. ArXiv preprint, abs/2212.10560, 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2212.10560>.
- Shengqiong Wu, Hao Fei, Leigang Qu, Wei Ji, and Tat-Seng Chua. Next-gpt: Any-to-any multimodal llm. ArXiv preprint, abs/2309.05519, 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2309.05519>.
- Yusong Wu, K. Chen, Tianyu Zhang, Yuchen Hui, Taylor Berg-Kirkpatrick, and Shlomo Dubnov. Large-scale contrastive language-audio pretraining with feature fusion and keyword-to-caption augmentation. ICASSP 2023 - 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp. 1–5, 2022. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID: 253510826>.
- Neil Zeghidour, Alejandro Luebs, Ahmed Omran, Jan Skoglund, and Marco Tagliasacchi. Soundstream: An end-to-end neural audio codec. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 30:495–507, 2021. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID: 236149944>.
- Tyshchenko D., Franchuk T., Zakharov R., Moskalenko V. Підтримка динамічних потреб безпеки засобами VPN Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава: ПНТУ, 2024. Т. 3 (77). 149-152.
- Курилюх А., Капітон А. Використання штучного інтелекту для розвитку CRM-систем. Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій. Одеса: ОНТУ, 2024. 357-359.
- Капітон А., Сухоребрій О., Ненич Д. Використання мультимодального штучного інтелекту в економіці, освіті, науці та транспорті. Інформаційні технології та цифрова економіка. Київ: ДУІТ, 2024. 83-85.
- Капітон А., Гладкий С., Пророк М. Практичні застосування інтеграції штучного інтелекту в процес освіти. Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій Одеса: ОНТУ, 2024. 348-349.
- PwC's 2023 Emerging Technology Survey. URL: <https://www.pwc.com/us/en/tech-effect/ai-analytics/ai-predictions.html>
- Gemini. URL: <https://blog.google/technology/ai/google-gemini-ai/#sundar-note>
- Bing. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/edge/features/the-newbing?form=MA13FJ>
- Introducing LLaMA. URL: <https://ai.meta.com/blog/large-language-model-llamameta-ai/>
- Chat With RTX. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/ai-on-rtx/chat-with-rtxgenerative-ai/>
- Verner S. IBM adds AI-enhanced data resilience capabilities to help combat ransomware and other threats with enhanced storage solutions, 2024. URL: newsroom.ibm.com/
- AnyGPT: Unified Multimodal LLM with Discrete Sequence Modeling URL: <https://arxiv.org/pdf/2402.12226>
- Laion-aesthetics. URL: <https://laion.ai/blog/laion-aesthetics/>, 2022a.
- Laion coco: 600m synthetic captions from laion2b-en. URL: <https://laion.ai/blog/laion-coco/>, 2022b.
- AI identification tools URL: <https://thetransmitted.com/ai/instrumenty-identyfikacziyi-shi-zhovten-2024/>

Received (Надійшла) 26.06.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.10.2024

Еволюція та аналіз розвитку мультимодальних систем штучного інтелекту

А. Капітон, Д. Тищенко, А. Десятко, В. Лазоренко

Анотація. У статті розглянуто основні аспекти еволюції та проаналізовано розвиток мультимодальних систем штучного інтелекту. Визначено, що в сучасних реаліях штучний інтелект зазнає трансформаційного зсуву в бік охоплення мультимодальності у великих мовних моделях. Проаналізовано шляхи вдосконалення великих мовних моделей за допомогою здатності обробляти і генерувати великий обсяг даних. Метою цього дослідження є аналіз вимог до розробки та впровадження мультимодальних систем штучного інтелекту. Досліджено етапи трансформації штучного інтелекту у напрямку мультимодальності інноваційного розвитку у великих мовних моделях. Розглянуто питання верифікації та взаємодії інформаційних систем з навколишнім світом. Визначено, що вони за своєю суттю є мультимодальними, багатоконпонентними. Проаналізовано шляхи вдосконалення великих мовних моделей за допомогою здатності обробляти і генерувати різні модальності даних. Досліджено, що сучасні мультимодальні системи штучного інтелекту ефективно використовуються в різних галузях науки, освіти, економіки та потребують подальшого розвитку та вдосконалення. Визначено, що внаслідок бурхливого розвитку інформаційних технологій та систем в різних спектрах життєдіяльності, ШІ переживає бурхливу модифікацію, де особливої уваги заслуговують генеративні моделі, які стають все більш досконалими. Виконано огляд архітектури моделі AnyGPT, де модальності токенизуються в дискретні токени, на основі яких LLM виконує мультимодальне сприйняття та генерування в авторегресії. Визначено, що методологія, що лежить в основі AnyGPT, є багатоконпонентною, модель якої демонструє можливості на рівні зі спеціалізованими моделями в усіх протестованих модальностях оцінювання. Встановлено, що інструменти, призначені для виявлення об'єктів, згенерованих штучним інтелектом, перебувають у стані розвитку, та постійно модифікуються.

Ключові слова: штучний інтелект, біоінженерія, генеративні моделі, мультимодальність.

Anton Kartashov, Larysa Globa

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

TOWARDS SEAMLESS MULTI-CLOUD INTEGRATION: STRATEGIC APPROACH

Abstract. Background. Cloud computing has transformed the IT landscape, offering scalable and cost-efficient solutions for data storage and access. The emergence of multi-cloud environments as a strategic approach to leverage various cloud service providers' strengths has introduced new challenges and opportunities. Existing multi-cloud frameworks and approaches lack versatility in addressing key concepts such as data security, scalability, cost optimization, and resource management. **Objective.** Designing and developing an ontological model and optimization function to enhance data management practices and decision-making in multi-cloud environments. **Methods.** The research employs an ontological approach to formalize domain concepts, relationships, and properties in multi-cloud environments. Additionally, an optimization function is proposed for selecting the best public cloud provider based on specific features. The study focuses on designing distributed storage techniques, optimizing data access latency, and developing security frameworks for multi-cloud settings. **Results.** The proposed ontological model successfully formalizes the domain's concepts, relationships, and properties in multi-cloud environments. The optimization function demonstrates effectiveness in selecting the most suitable public cloud provider based on the proposed features, enhancing data management practices automation and decision-making processes. **Conclusions.** This work addresses the critical challenge of improving data management and decision-making in multi-cloud environments through the development of an ontological model and optimization function. The research contributes to enhancing data security, scalability, cost optimization, and resource management in multi-cloud settings. Future work should focus on further refining the ontological model and optimization function, as well as exploring their application in various industry sectors.

Keywords: Cloud computing, multi-cloud environments, data storage, data access, ontological model, optimization function, data security, scalability, cost optimization, resource management.

Introduction

In recent times, cloud computing has transformed the landscape of the IT industry, providing scalable and cost-effective solutions for data storage and access. Notably, the emergence of multi-cloud environments has become a strategic approach to leverage the diverse strengths of various cloud service providers, thereby reducing the risks of vendor lock-in and optimizing overall system performance [1].

However, the process of migrating applications and/or data to the cloud has proven to be a complex endeavour. Numerous hurdles exist that impede the realization of cloud computing's full potential [2]. These difficulties often stem from the fact that existing applications have specific requirements and attributes that need fulfilment by cloud providers [3].

These challenges present an opening to establish a systematic approach for the assessment and quantification of cloud providers. Each provider extends analogous services with varying cost structures, performance metrics, security layers, and an array of features [4]. The large number of diverse service packages makes objective evaluation of different cloud providers' quality, performance, security, privacy, and dependability a daunting task [5].

This scientific paper delves into the domain of cloud computing, focusing specifically on data storage and access within multi-cloud setups. Our research explores the significant importance of this domain, encompassing critical aspects such as data security, scalability, cost optimization, and resource management.

The primary goal of this paper is to propose a comprehensive ontological model that formally represents key concepts, relationships, and properties within the domain of cloud computing and multi-cloud

environments. This ontological model serves as a foundational framework to enhance our understanding of the complex interactions and interdependencies that exist in the cloud ecosystem. Moreover, it lays the groundwork for informed decision-making and innovative developments in cloud technologies.

To achieve this objective, the paper is structured as follows: Section 1 discusses the lessons learned from the literature and also defines cloud evaluation criteria conducted from the previous research. Section 2 introduces the ontological model designed to formalize the concepts, relationships, and properties in cloud computing and multi-cloud environments. It outlines the structure and key components of the model, elucidating how it helps capture the complexity and nuances of the cloud domain. Further Section 3 describes the Optimization Function for Cloud Provider Selection. Here, we present an optimization function that facilitates the selection of the most suitable public cloud provider based on a set of proposed features. This function leverages the ontological model to calculate a score for each cloud provider, enabling data-driven decisions and enhanced performance in multi-cloud setups. The conclusion provides a summary of the key contributions and insights gained from the research. It reiterates the significance of the proposed ontological model and optimization function and offers concluding remarks on their potential impact on the field of cloud computing.

1. Set of criteria for multi-cloud storage

The field of cloud computing has witnessed extensive research efforts aimed at understanding the intricacies of multi-cloud environments and optimizing data storage and access strategies. Several studies have highlighted the advantages of adopting multi-cloud architectures, such as increased redundancy, improved

performance, and enhanced fault tolerance [6]. Multi-cloud solutions also provide organizations with the flexibility to choose cloud services based on specific requirements, ensuring cost-effectiveness and mitigating the risk of relying solely on one cloud provider [7].

Based on our literature review, conducted in the previous paper, and current cloud computing standards

for storage and access, we define a complex set of criteria for storing data in multi-clouds that includes consideration of a wide range of factors that may affect the location, management, and retrieval of data across different cloud service providers [8]. Table 1 shows a comprehensive set of criteria that should be considered in the research.

Table 1 – Comprehensive set of Criteria

#	Criteria Category	Specific Criteria	Measurement Metric (possible)
1	Data Accessibility Criteria	Latency Requirements	Milliseconds (ms)
2		Redundancy and Availability	Availability Percentage (%)
3		Data Consistency	Data Consistency Index
4		Data Encryption	Encryption Strength (e.g., AES-256)
5	Cost and Resource Utilization Criteria	Cost Efficiency	Cost per GB/month (\$)
6		Resource Allocation	Resource Utilization (%)
7		Data Lifecycle Management	Percentage of Archived Data (%)
8	Data Type and Format Criteria	Data Classification	Data Classification Score
9		Data Format	Data Format Compatibility
10	Compliance and Security Criteria	Regulatory Compliance	Compliance Audit Score
11		Data Ownership	Data Ownership Policy Adherence
12		Security Protocols	Security Protocol Strength
13	Scalability and Performance	Scalability	Scalability Factor
14		Performance Metrics	Throughput (requests/second)
15	Data Migration and Interoperability Criteria	Data Portability	Data Portability Index
16		Interoperability	Interoperability Score
17	Vendor Lock-In and Vendor Criteria	Vendor Lock-In Mitigation	Lock-In Reduction Score
18		Vendor Reputation	Vendor Reputation Rating
19	Disaster Recovery and Backup	Disaster Recovery Plan	Recovery Time Objective (RTO, hours)
20		Recovery Point Objective (RPO) and RTO	Recovery Point Objective (RPO, hours)
21		Data Backup Frequency	Frequency (e.g., per day, per week)
22		Backup Storage Redundancy	Redundancy Level (e.g., dual-site)
23	Monitoring and Reporting	Monitoring Tools	Tool Effectiveness (e.g., Score)
24		Reporting	Reporting Accuracy (e.g., Percentage)
25	Sustainability	Environmental Impact	Carbon Emission Reduction (%)
26		Energy Efficiency	Energy Usage (kWh)
27		Resource Sustainability	Resource Conservation Index

2. Defining Ontological Model

To formalize the concepts and relationships in the domain of cloud computing with a focus on data storage and access in multi-cloud environments, we propose an ontological model based on the defined set of criteria. This model represents the essential components, interconnections, and properties of cloud providers, cloud services, storage systems, access control mechanisms, data encryption algorithms, and other key entities. The ontological model enables a systematic and structured representation of the domain, facilitating better understanding, knowledge sharing, and future research:

A. Ontological Model

1. **CloudProvider**: Represents a cloud service provider, and it is characterized by the "hasName" property.

2. **CloudService**: Represents a cloud service offered by a provider, and it is characterized by the "hasName" property, and the "providesService" relationship, which relates a cloud provider to the services it offers.

3. **StorageSystem**: Represents a storage system used by a cloud service, and it is characterized by the "hasName" property, and the "usesStorageSystem" relationship, which relates a cloud service to the storage system it uses.

4. **AccessControlMechanism**: Represents an access control mechanism implemented by a cloud service, and it is

characterized by the "hasName" property, and the "implementsAccessControl" relationship, which relates a cloud service to the access control mechanism it implements.

5. **DataEncryptionAlgorithm**: Represents a data encryption algorithm used by a cloud service, and it is characterized by the "hasName" property, and the "usesEncryptionAlgorithm" relationship, which relates a cloud service to the encryption algorithm it uses.

6. **ServiceLevelAgreement**: Represents a service level agreement associated with a cloud service, and it is characterized by the "hasDescription" property, and the "hasSLA" relationship, which relates a cloud service to the service level agreement.

7. **DataReplication**: Represents a data replication mechanism performed by a storage system, and it is characterized by the "hasName" property, and the "performsReplication" relationship, which relates a storage system to the data replication mechanism it performs.

8. **Application**: Represents an application hosted by a cloud service, and it is characterized by the "hasName" property, and the "hostedBy" relationship, which relates an application to the cloud service hosting it.

9. **DataAccessMethod**: Represents a data access method used by an application, and it is characterized by the "hasName" property, and the "usesAccessMethod" relationship, which relates an application to the data access method it uses.

10. **DataStorageTier**: Represents a storage tier available in a storage system, and it is characterized by the "hasName"

property, and the "hasStorageTier" relationship, which relates a storage system to the available storage tiers.

11. **DataConsistencyModel**: Represents a data consistency model followed by a cloud service, and it is characterized by the "hasName" property, and the "followsConsistencyModel" relationship, which relates a cloud service to the data consistency model it follows.

12. **DataBackupStrategy**: Represents a data backup strategy used by a storage system, and it is characterized by the "hasName" property, and the "hasBackupStrategy" relationship, which relates a storage system to the data backup strategy.

13. **DataTransferProtocol**: Represents a data transfer protocol supported by a cloud service, and it is characterized by the "hasName" property, and the "supportsTransferProtocol" relationship, which relates a cloud service to the supported data transfer protocol.

14. **DataCompressionAlgorithm**: Represents a data compression algorithm used by a cloud service, and it is characterized by the "hasName" property, and the "usesCompressionAlgorithm" relationship, which relates a cloud service to the compression algorithm it uses.

15. **DataIndexingMethod**: Represents a data indexing method used by a cloud service, and it is characterized by the "hasName" property, and the "usesIndexingMethod" relationship, which relates a cloud service to the indexing method it uses.

16. **DataVersioningMethod**: Represents a data versioning method used by a cloud service, and it is characterized by the "hasName" property, and the "usesVersioningMethod" relationship, which relates a cloud service to the versioning method it uses.

17. **DataLifecycleManagement**: Represents a data lifecycle management mechanism used by a cloud service, and it is characterized by the "hasName" property, and the "hasLifecycleManagement" relationship, which relates a cloud service to the data lifecycle management mechanism.

18. **DataMigrationStrategy**: Represents a data migration strategy followed by a cloud service, and it is characterized by the "hasName" property, and the "followsMigrationStrategy" relationship, which relates a cloud service to the data migration strategy.

19. **DataSharingMechanism**: Represents a data sharing mechanism supported by a cloud service, and it is characterized by the "hasName" property, and the "supportsSharingMechanism" relationship, which relates a cloud service to the supported data sharing mechanism.

The ontological model presented above represents a comprehensive domain of cloud computing, with a specific focus on data storage and access in multi-cloud environments.

Each concept is enriched with properties and relationships that allow for detailed descriptions and associations.

The axioms are logical statements that define specific relationships, constraints, and properties within the ontological model.

The logical representation of the axioms further strengthens the ontological model. These axioms provide a formal foundation for the representation and reasoning of cloud-related concepts, enabling the development of optimized algorithms and decision-making processes in selecting the best cloud provider based on the proposed features.

By combining the axioms with the ontological model, we can gain deeper insights into the domain.

B. Logical representation of the axioms:

1. Each **CloudProvider** provides at least one **CloudService**.
 - $\forall x \text{CloudProvider}(x) \rightarrow \exists y \text{CloudService}(y) \wedge \text{providesService}(x, y)$
2. Each **CloudService** uses exactly one **StorageSystem**.
 - $\forall x \text{CloudService}(x) \rightarrow \exists y \text{StorageSystem}(y) \wedge \text{usesStorageSystem}(x, y)$
 - $\forall x, y, z (\text{CloudService}(x) \wedge \text{usesStorageSystem}(x, y) \wedge \text{usesStorageSystem}(x, z) \wedge y \neq z) \rightarrow \text{False}$
3. Each **CloudService** implements at least one **AccessControlMechanism**.
 - $\forall x \text{CloudService}(x) \rightarrow \exists y \text{AccessControlMechanism}(y) \wedge \text{implementsAccessControl}(x, y)$
4. Each **CloudService** uses at least one **DataEncryptionAlgorithm**.
 - $\forall x \text{CloudService}(x) \rightarrow \exists y \text{DataEncryptionAlgorithm}(y) \wedge \text{usesEncryptionAlgorithm}(x, y)$
5. Each **CloudService** has exactly one **ServiceLevelAgreement**.
 - $\forall x \text{CloudService}(x) \rightarrow \exists ! y \text{ServiceLevelAgreement}(y) \wedge \text{hasSLA}(x, y)$
6. Each **StorageSystem** performs at least one **DataReplication** mechanism.
 - $\forall x \text{StorageSystem}(x) \rightarrow \exists y \text{DataReplication}(y) \wedge \text{performsReplication}(x, y)$
7. Each **Application** is hosted by exactly one **CloudService**.
 - $\forall x \text{Application}(x) \rightarrow \exists ! y \text{CloudService}(y) \wedge \text{hostedBy}(x, y)$
8. Each **Application** uses at least one **DataAccessMethod**.
 - $\forall x \text{Application}(x) \rightarrow \exists y \text{DataAccessMethod}(y) \wedge \text{usesAccessMethod}(x, y)$
9. Each **StorageSystem** has at least one **DataStorageTier**.
 - $\forall x \text{StorageSystem}(x) \rightarrow \exists y \text{DataStorageTier}(y) \wedge \text{hasStorageTier}(x, y)$
10. Each **CloudService** follows at least one **DataConsistencyModel**.
 - $\forall x \text{CloudService}(x) \rightarrow \exists y \text{DataConsistencyModel}(y) \wedge \text{followsConsistencyModel}(x, y)$

These axioms express logical statements that define the relationships and constraints within the ontology, specifying the required conditions and properties for the concepts involved.

In the current context of the ontological model, relationships play a vital role in defining the connections and interactions between various concepts. Each relationship is expressed through a logical statement that establishes a link between two entities in the domain.

C. Descriptions of the relationships

1. **providesService** (**CloudProvider**, **CloudService**) Indicates that a specific **CloudProvider** delivers a particular **CloudService** to users.
2. **usesStorageSystem** (**CloudService**, **StorageSystem**) Specifies that a particular **CloudService** relies on a specific **StorageSystem** for data storage and management.
3. **implementsAccessControl** (**CloudService**, **AccessControlMechanism**) Indicates that a specific **CloudService** employs a particular **AccessControlMechanism** to regulate data access and user permissions.
4. **usesEncryptionAlgorithm** (**CloudService**, **DataEncryptionAlgorithm**) Specifies that a particular

CloudService employs a specific DataEncryptionAlgorithm to protect data confidentiality.

5. **hasSLA** (CloudService, ServiceLevelAgreement) Indicates that a specific CloudService is bound by a particular ServiceLevelAgreement that defines the quality of service and performance guarantees.

6. **performsReplication** (StorageSystem, DataReplication) States that a particular StorageSystem implements a specific DataReplication mechanism to duplicate data for fault tolerance and availability.

7. **hostedBy** (Application, CloudService) Indicates that a specific Application is hosted and executed by a particular CloudService.

8. **usesAccessMethod** (Application, DataAccessMethod) Specifies that a particular Application utilizes a specific DataAccessMethod for data interactions.

9. **hasStorageTier** (StorageSystem, DataStorageTier) Specifies that a particular StorageSystem offers a specific DataStorageTier with distinct performance characteristics.

10. **followsConsistencyModel** (CloudService, DataConsistencyModel) Indicates that a particular CloudService adheres to a specific DataConsistencyModel to maintain data integrity.

In summary, the logical statements describing these relationships provide essential insights into the associations and interactions between different components in the ontology of cloud computing with a focus on data storage and access in a multi-cloud environment.

These relationships form the backbone of the ontological model, which is visually shown on the Fig. 1, enabling a comprehensive understanding of the domain and facilitating the optimization of cloud provider selection based on proposed features.

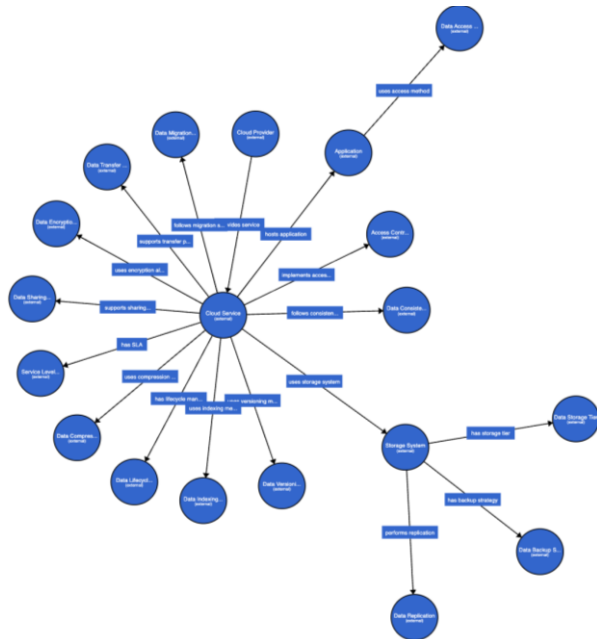


Fig.1. Visual representation of the Ontological model

3. Setting Optimisation Function

In order to make informed decisions when selecting the best public cloud provider in a multi-cloud environment, we introduce an optimisation function.

This function incorporates a weighted scoring mechanism based on relevant criteria such as data

security, performance, cost-effectiveness, compliance, and scalability. By assigning appropriate weights to these criteria, the optimisation function calculates a score for each cloud provider, aiding decision-makers in choosing the most suitable option that aligns with their specific requirements and objectives.

To define the optimization function in algebraic form, we can express it as a weighted sum of the desired features:

- V = Set of cloud vendors (AWS, Azure, GCP);
- F = Set of desired features;
- W = Set of weights corresponding to each desired feature.

The optimization function can be defined as follows:

$$Score = \sum [feature \in F \cap vendor](W[feature]), \quad (1)$$

where:

- $Score(vendor)$ represents the score of a specific cloud vendor based on the presence of desired features and their corresponding weights;
- $feature \in F \cap vendor$ denotes that the feature is both desired and offered by the vendor;
- $W[feature]$ represents the weight assigned to each desired feature.

The function calculates the score for each vendor by summing the weights of the desired features that are present in the vendor's offerings. The higher the score, the more suitable the vendor is considered for data storage based on the desired features and their assigned weights.

More complex optimization function could involve additional factors or constraints, such as cost, performance, and reliability. An example of an extended optimization function that considers cost and performance along with the presence of desired features:

- V = Set of cloud vendors (AWS, Azure, GCP);
- F = Set of desired features;
- W = Set of weights corresponding to each desired feature;
- $C(vendor)$ = Cost factor for a specific vendor;
- $P(vendor)$ = Performance factor for a specific vendor.

The optimization function can be defined as follows:

$$Score = \sum [feature \in F \cap vendor](W[feature]) + \alpha \cdot C(vendor) + \beta \cdot P(vendor), \quad (2)$$

where α and β are coefficients that determine the relative importance of cost and performance in the optimization function.

The function calculates the score for each vendor by summing the weights of the desired features present in the vendor's offerings and adjusting it based on the cost and performance factors.

The coefficients α and β control the balance between cost and performance considerations.

For example, if a particular feature's contribution to the score is dependent on a continuous variable

(e.g., time, data volume, latency), the function could involve integrals to evaluate the accumulated effect over a range of values. Similarly, derivatives can be utilized to capture the rate of change or sensitivity of certain factors.

Future research could involve expanding the ontological model to include additional criteria and to account for changes in technological infrastructure for cloud storage.

It is also crucial to continually refine the ontological model by adapting it to new requirements and emerging technologies.

Furthermore, the development of an optimization function within the ontological model could enhance its efficacy in dynamically adjusting data distribution strategies based on real-time performance metrics and cost considerations.

Conclusion

In conclusion, the research domain of cloud computing with a focus on data storage and access in multi-cloud environments represents a vital area of study with profound implications for data management practices. This scientific paper highlights the importance and scientific goals, emphasizing the need for advanced security measures, scalable storage solutions, and efficient resource management strategies.

By proposing an ontological model and an optimisation function, we aim to enhance data management practices, drive innovation in cloud technologies, and facilitate informed decision-making in multi-cloud environments. They both serve as a foundation for further research and the enhancement of strategies for multi-cloud environments.

REFERENCES

1. Hong, Jiangshui & Dreiholz, Thomas & Schenkel, Joseph & Hu, Jiaxi. (2019). An Overview of Multi-cloud Computing. 10.1007/978-3-030-15035-8_103.
2. Alonso, J., Orue-Echevarria, L., Casola, V. et al. Understanding the challenges and novel architectural models of multi-cloud native applications – a systematic literature review. *J Cloud Comp* 12, 6 (2023). <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00367-6>
3. Tomarchio, O., Calcaterra, D. & Modica, G.D. Cloud resource orchestration in the multi-cloud landscape: a systematic review of existing frameworks. *J Cloud Comp* 9, 49 (2020). <https://doi.org/10.1186/s13677-020-00194-7>
4. [18] T. G. Papaioannou, N. Bonvin, and K. Aberer, "Scalia: An adaptive scheme for efficient multi-cloud storage," in *Proceedings of the International Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, ser. SC '12. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society Press, 2012, pp. 20:1–20:10.
5. Celesti, A., Galletta, A., Fazio, M. and Villari, M., 2019. Towards hybrid multi-cloud storage systems: Understanding how to perform data transfer. *Big Data Research*, 16, pp.1-17.
6. Li J, Lin D, Squicciarini AC, Li J, Jia C (2017) Towards privacy preserving storage and retrieval in multiple clouds. *IEEE Trans Cloud Comput* 5(3):499–509. <https://doi.org/10.1109/TCC.2015.2485214>
7. Tchernykh, A., Babenko, M., Miranda-López, V., Drozdov, A.Y. and Avetisyan, A., 2018, May. WA-RRNS: Reliable data storage system based on multi-cloud. In *2018 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW)* (pp. 666-673). IEEE.
8. Anton Kartashov and Larysa Globa Overview of the Approaches to Managing Distributed Storage and Access to Cloud Data/Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT. Volume 11, Issue 2, pp. 19-29. (DOI:10.25673/112990)

Received (Надійшла) 12.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.11.2024

Шлях до безшовної мультимарної інтеграції: стратегічний підхід

А. Д. Карташов, Л. С. Глоба

Анотація. Проблематика. Хмарні обчислення трансформували ІТ-індустрію, пропонуючи масштабовані та економічно ефективні рішення для зберігання та доступу до даних. Поява мультимарних середовищ як стратегічного підходу до використання переваг різних постачальників хмарних послуг створила нові виклики та можливості. Існуючим мультимарним фреймворкам та підходам бракує універсальності у вирішенні ключових концепцій, таких як безпека даних, масштабованість, оптимізація витрат та управління ресурсами. **Мета досліджень.** Розробка та впровадження онтологічної моделі та функції оптимізації для вдосконалення практик управління даними та прийняття рішень у мультимарних середовищах. **Методика реалізації.** Дослідження використовує онтологічний підхід для формалізації концепцій, зв'язків та властивостей онтологічної моделі у мультимарних середовищах. Крім того, запропоновано функцію оптимізації для вибору найкращого публічного хмарного провайдера на основі конкретних характеристик. Дослідження зосереджується на розробці методів розподіленого зберігання даних з урахуванням запропонованого набору вимог для мультимарних середовищ. **Результати досліджень.** Запропонована онтологічна модель успішно формалізує концепції, зв'язки та властивості онтологічної моделі в мультимарних середовищах. Функція оптимізації демонструє ефективність у виборі найбільш підходящого публічного хмарного провайдера на основі запропонованих характеристик, покращуючи автоматизацію практик управління даними та процесів прийняття рішень. **Висновки.** Ця робота пропонує оптимізоване рішення критичної проблеми вдосконалення управління даними та прийняття рішень у мультимарних середовищах шляхом розробки онтологічної моделі та функції оптимізації. Дослідження сприяє підвищенню безпеки даних, масштабованості, оптимізації витрат та управління ресурсами в мультимарних середовищах. Майбутні дослідження повинні зосередитися на подальшому вдосконаленні онтологічної моделі та функції оптимізації, а також на вивченні їх застосування в різних галузях промисловості.

Ключові слова: хмарні обчислення, мультимарні середовища, зберігання даних, доступ до даних, онтологічна модель, функція оптимізації, безпека даних, масштабованість, оптимізація витрат, управління ресурсами.

А. Касерес, Л. С. Глоба

Національний технічний університет України «КПІ імені І. Сікорського», Київ, Україна

ПІДХІД ДО ФОРМУВАННЯ МУЛЬТИХМАРНОГО СЕРЕДОВИЩА НА ОСНОВІ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ТА ОНТОЛОГІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Анотація. На сьогоднішній день використання декількох хмар для збереження і обробки даних вже є розповсюдженою практикою по всьому світу. Кожний постачальник хмарних ресурсів пропонує для цього різні рішення, що ускладнює вибір користувачеві постачальника послуг, адже він, у свою чергу, прагне досягти максимальної ефективності за найменших витрат. У даній роботі досліджуються багатохмарні парадигми: мультихмарні шлюзи зберігання даних, платформи керування даними та хмарно-незалежні бібліотеки. В даному дослідженні пропонується на основі багатокритеріального аналізу (MCDA) методами АНР і TOPSIS обрати кращий підхід для корпоративних і академічних рішень. Критеріями слугують вартість, зусилля щодо впровадження, безпека і продуктивність. Крім того, запропоновано онтологічну модель для формування гнучкого сценарію вибору мультихмарних підходів, оригінальність якої полягає у використанні вагових коефіцієнтів отриманих з практичних експериментів із застосуванням АНР та TOPSIS методів, та сфокусованих на специфіці використання мультихмарних середовищ у корпоративному та академічному середовищах. Це дозволяє отримати найбільш ефективні способи поєднання хмарних сервісів для конкретного сценарію застосування. Проведені експериментальні дослідження дозволяють зробити висновок, що для академічних задач найбільше підходять мультихмарні шлюзи зберігання даних, проте для корпоративних середовищ - хмарно-незалежні бібліотеки і платформи керування даними.

Ключові слова: хмарні обчислення, мульти-хмара, сумісність даних, MCDA, онтологічна модель.

Вступ

У сфері хмарних обчислень багатохмарна архітектура є ефективним рішенням для компаній, які прагнуть отримати вигоду, суміщаючи переваги різних постачальників хмарних послуг. Відповідно до звіту Flexera 2024, спостерігається зростання інтеграції даних між хмарами до 45% з 37% у 2023-2024 роках, оскільки організації шукають найкращий варіант для прикладних програмних систем та аналізу даних [1]. У цьому звіті підкреслюється тенденція до зростання впровадження багатохмарних стратегій, а також вказується на вирішальну роль взаємодії даних у повному використанні потенціалу багатохмарних архітектур.

Зростання впровадження мультихмарних технологій разом із зростаючим попитом на ефективну сумісність даних створює складну проблему для організацій. Різноманітність хмарних платформ, кожна з яких має специфічні для постачальника API, служби та механізми безпеки, збільшує складність мультихмарних архітектур [2]. Ця складність вимагає структурованого та стратегічного підходу до прийняття рішень. Рішення щодо сумісності мають не тільки відповідати технічним вимогам інтеграції, але й відповідати ширшим організаційним цілям щодо масштабованості, продуктивності та вартості [3]. Використання багатохмарного підходу потребує методів, які дозволяють організаціям застосовувати найбільш ефективні стратегії. Серед доволі великої кількості підходів мультихмарної взаємодії [4-6] організаціям необхідно обрати саме ті, які найкращим чином відповідають їхнім потребам. Основними критеріями, які можуть бути важливі на етапі вибору тих чи інших засобів можна назвати такі: швидкодія, безпека, складність впровадження, вартість. Якщо швидкодія та вартість простіше розрахувати, то такі параметри як безпека та складність впровадження є доволі непростими з точки зору їх визначення, для чого застосовують різноманітні інтелектуальні методи. Такі обчислення в реальних умовах є затратними.

Таким чином, метою даної роботи є створення онтологічної моделі на основі багатокритеріального аналізу, яка дозволить визначитися з гнучким сценарієм формування набору інструментарію для реалізації мультихмарного доступу в конкретній організації. Онтологічна модель визначає оптимальний за комплексним критерієм набір технологій для академічних і корпоративних рішень. У якості методів багатокритеріального аналізу використано метод TOPSIS, результати якого порівняно з аналогічним методом АНР. У якості досліджуваних підходів обрано мультихмарні шлюзи зберігання даних (наприкладі S3Proху), платформи керування даними (Apache NiFi) та хмарно-незалежні бібліотеки (Apache Libcloud).

Огляд сучасного стану підходів мультихмарної взаємодії

В даний час роль мультихмарних технологій продовжує зростати. Чисельні статті говорять про значні переваги їх використання [7-9]: незалежність від постачальника; економічна ефективність; покращена безпека. Але разом з тим, перш ніж розгортати мультихмарну стратегію, організація має врахувати такі фактори: вибір інструментарію; підготовку персоналу; моніторинг і оновлення налаштувань.

Наразі існує досить багато мультихмарних підходів. Розглянемо деякі з них.

Інструменти стандартизації API. Це група рішень, які дозволяють приховати відмінності API різних хмарних постачальників, тобто використовувати той самий робочий процес для керування декількома провайдерами, полегшуючи керування хмарами [10, 11]. До вказаних інструментів можна віднести JClouds, Pulumi, Apache Libcloud, Terraform та інші.

Мультихмарні шлюзи зберігання (Multi-Cloud Storage Gateways (MSG)). Дозволяють отримати доступ до хмарного сховища між різними постачальниками через єдиний інтерфейс, тобто діють як міст між локальними програмами та віддаленими хмарними

центрами зберігання [12]. Окрім ліквідації розриву між застарілими рішеннями для зберігання даних і хмарними технологіями вони надають низку додаткових переваг. Серед таких – спрощений доступ до файлів для користувачів, спрощене керування сховищем і зниження витрат [13]. Лідерами на ринку MSG можна назвати: web-сервіси Amazon, Microsoft, Oracle, NetApp, Inc, Dell EMC. Серед прикладів можна виділити MinIO, S3Proху, Hitachi Content Platform Anywhere Edge, AWS Storage Gateway та інші.

Контейнеризація та оркестровка контейнерів. Оркестровка хмарних ресурсів (процес автоматизованого керування кількома робочими навантаженнями в кількох хмарних рішеннях) стосується складних операцій, таких як вибір, розгортання, моніторинг і керування ресурсами під час виконання [14]. Контейнеризація дозволяє програмам працювати узгоджено в різних хмарних середовищах. Інструменти оркестровки контейнерів додатково полегшують керування цими контейнерами в хмарах. Представниками даного підходу є Docker Swarm, Google Kubernetes, Apache Mesos, тощо.

Платформи керування даними (Data Management Platform (DMP)). Такі платформи дозволяють переміщувати, перетворювати та керувати даними в кількох хмарних середовищах без прив'язки до певного постачальника хмарних технологій [15]. Підходять для організацій, яким необхідно обробляти велику кількість різноманітних даних. Прикладами є Azure Synapse Analytics, Google Cloud BigQuery, Talend, Apache NiFi.

Також серед менш поширених підходів мультихмарної взаємодії можна назвати Multi-Cloud Service Mesh, Гібридну хмару та багатохмарну мережу (Hybrid Cloud and Multi-Cloud Networking), Міжхмарні конвеєри CI/CD (Cross-Cloud CI/CD Pipelines).

Але разом з тим, вибір конкретного технічного рішення в конкретних умовах їх застосування вимагає окремих досліджень через різноманітність вимог до продуктивності, безпеки та витрат, а також необхідність враховувати попередній досвід використання аналогічних рішень у подібних середовищах.

В дослідженні зосередимось на прикладах Apache Libcloud (хмарно-незалежна бібліотека), S3Proху (MSG) та Apache NiFi (DMP), тому що дані технології є open-source, тобто доступні для безкоштовного використання, є гнучкими – дозволяють адаптувати програмне забезпечення кінцевого користувача до структури мультисередовища під різні потреби і націлені на автоматизацію бізнес-процесів в ньому.

Вибір методу багатокритеріального аналізу

При виборі мультихмарної стратегії організацію цікавить ефективність, яку можливо від цього отримати, а це безпосередньо пов'язано з вартістю обслуговування, швидкістю обробки даних, безпечністю, а також складністю налаштувань системи [16]. Таким чином, кожен з цих підходів оцінюватиметься за критеріями продуктивності, вартості, зусиль впровадження і безпеки.

Розглянемо чотири критерії, за якими необхідно обрати той підхід, який найкраще задовольнить

потреби організації. Кожна організація ставить свої вимоги, тому необхідно створити модель, яка б враховувала специфічні потреби конкретного користувача.

Розглянемо побудову такої моделі на прикладі потреб академічних і корпоративних організацій. Очевидно, що у бюджетних організацій типу навчальних і медичних закладів будуть інші пріоритети, ніж у великих корпорацій, тому пропонується застосувати ранжування означених критеріїв.

З огляду на звіт [1] вартість є найбільш вагомим фактором для організацій різних типів, щодо інших параметрів запропоновано на основі практичного досвіду таку послідовність від найвищого до найнижчого пріоритетів.

Академічні рішення: вартість, зусилля впровадження, безпека і продуктивність.

Корпоративні рішення: вартість, безпека, продуктивність, зусилля впровадження.

У дослідженні [17] було використано метод АНР для створення моделі вибору мультисередовищного підходу, проте не було розділення пріоритетів для корпорації і академії. Крім того, у поточному дослідженні розглянуто додатковий метод для порівняння отриманих теоретичних результатів та гарантування їх достовірності. Виходячи з огляду джерел [18-21] обрано метод TOPSIS. Його суть полягає у виборі тієї альтернативи, яка є найближчою до ідеальної. Також він дозволяє враховувати важливість кожного критерію, так само як і метод АНР.

Постановка задачі

Серед підходів мультисередовищної взаємодії необхідно обрати найбільш оптимальний для академічних і корпоративних задач, спираючись на критерії вартості, продуктивності, безпеки і зусиль щодо впровадження.

Вхідні дані:

Альтернативи: $A = \{CAL, SG, DMP\}$,

де SG – мультисередовищні шлюзи зберігання даних, DMP – платформи керування даними, CAL – хмарно-незалежні бібліотеки.

Критерії: $CR = \{C, P, S, IE\}$,

де C – вартість, P – продуктивність (у значенні швидкості доступу до файлів), S – безпека, IE – зусилля щодо впровадження.

Вартість C може бути обчислена на основі таких складових: витрати на зберігання, витрати на екземпляр віртуальної машини та витрати на запити:

$$C = \sum_{i=1}^K C_i, \quad (1)$$

де K – кількість цінкових факторів.

Продуктивність P у нашому випадку – це середній час передавання файлів різного розміру:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n T_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}, \quad (2)$$

де S_i – розмір i -го файлу, T_i – час доступу до i -го файлу, n – кількість файлів.

Для оцінки безпеки варто врахувати такі аспекти як автентифікація та авторизація, шифрування даних, забезпечення відмовостійкості. У дослідженні використано ваги для таких параметрів безпеки S : W_a – керування ідентифікацією та доступом, W_s – шифрування, W_l – логування та моніторинг.

$$S = W_a + W_s + W_l. \quad (3)$$

Ваги безпекових параметрів наведені в табл. 1. Пропонується призначити ваги таким чином: 1 – базовий рівень безпеки, 2 – середній рівень, 3 – розширений. Зусилля впровадження IE – це час і ресурси, необхідні для розгортання рішення у мільтихмарному

середовищі. Для визначення критерію складності розгортання було залучено три провідні консалтингові компанії з розробки хмарних технологій: Crayon [22], Nordcloud [23] і Tech5 [24].

Їх оцінка представлена у табл. 2 у вигляді витрачених людино-годин.

Таблиця 1 – Ваги параметрів безпеки

Параметр безпеки	Хмарно-незалежні бібліотеки (вага)	Мультихмарні шлюзи зберігання даних (вага)	Платформи керування даними (вага)
Керування ідентифікацією та доступом	1	1	3
Шифрування	1	1	2
Логуювання та моніторинг	1	1	3

Таблиця 2 – Оцінка зусиль впровадження

Консалтингова компанія	Хмарно-незалежні бібліотеки (людино-години)	Мультихмарні шлюзи зберігання даних (людино-години)	Платформи керування даними (людино-години)
Nordcloud	30 - 50	40 - 60	40 - 60
Crayon	40 - 50	50 - 60	50 - 60
Tech-5	50 - 70	30 - 40	30 - 40

Для академічних і корпоративних задач вказані критерії мають різні пріоритети. Так, вартість є найважливішим параметром для обох видів задач. Проте, для академічних установ наступним за важливістю параметром є зусилля впровадження через обмеженість доступу до необхідних спеціалістів або їх навчання. Для корпоративних установ цей фактор не є проблематичним, тому має найменшу вагу. Наступним параметром обрано безпеку, так як в академічному середовищі також можливо обробляти досить вагомі дані, проте вимоги до безпеки є менш жорсткими, ніж у корпораціях. В той же час останні мають високі вимоги до стандартів безпеки і по пріоритету дана характеристика буде займати наступне місце після вартості. Продуктивність для академічних задач опиняється на останньому місці, для корпорації – займає місце після безпеки.

Таким чином отримуємо таку пріоритетність критеріїв:

- Для академічних рішень від найбільш вагомого: C, IE, S, P .
- Для корпоративних рішень від найбільш вагомого: C, S, P, IE .

Вихідні результати:

Для визначення оптимального підходу обчислити загальну оцінку для академічних і корпоративних рішень:

$$E_j = \sum_i w_i * x_{ij}, \quad (4)$$

де w_i – вага критерію CR_i , x_{ij} – оцінка альтернативи A_j за критерієм CR_i

Вибираємо підхід з максимальною оцінкою для кожної категорії задач.

$$Opt_{корп} = \max E_j, \quad Opt_{акад} = \max E_j. \quad (5)$$

Оптимальний підхід пропонується обирати за допомогою методів багатокритеріального аналізу АНР і TOPSIS.

Для обох методів першим кроком є створення таблиці (табл. 1) з альтернатив (рядки таблиці) і критеріїв (стовбці таблиці).

Алгоритм методу АНР:

1. Для кожного критерію створюється матриця попарних порівнянь альтернатив, де кожний елемент набуває значення від 1 до 9, причому однакові альтернативи приймають значення 1. Іншими цифрами показано перевагу однієї альтернативи над іншою. Чим більше число, тим більша перевага. Так як критеріїв чотири, має бути чотири матриці.

2. Далі створюється матриця попарного порівняння критеріїв, де аналогічно оцінюється перевага одного критерія над іншим. Для корпоративного і академічного підходів ці матриці будуть різними.

3. Нормалізація матриць.

4. Обчислення вектору пріоритетів, який покаже ранжування альтернатив (найбільшому значенню відповідає краща альтернатива).

5. Перевірка чутливості отриманих параметрів. Якщо значення не задовольняють певному пороговому значенню, необхідно провести корегування матриць попарного порівняння.

Алгоритм методу TOPSIS:

1. Нормалізація початкової матриці.

2. Розподілення значень ваги пріоритетів у відповідності до важливості критеріїв.

3. Обчислення нормалізованої зваженої матриці. У нашому випадку їх буде дві: для корпорації і академії.

4. Вибір найкращих і найгірших рішень з отриманих таблиць.

5. Обчислення відстані до найкращого і найгіршого значення для кожної альтернативи.

6. Визначення близькості кожної альтернативи до ідеального значення. Найбільше значення дає найвищий пріоритет.

Використання методу TOPSIS для аналізу мультихмарних підходів

Для кожного підходу були визначені параметри, наведені у табл. 3. Параметр продуктивності визначено як середній час доступу до файлів різного розміру.

Таблиця 3 – Загальна таблиця критеріїв

Підхід	Середня продуктивність, с	Середня вартість за ТБ, USD	Зусилля впровадження, людино-години	Безпека (вагові коефіцієнти)
Хмарно-незалежні бібліотеки	0,27	117,3	48	3
Мультихмарні шлюзи зберігання даних	0,34	121,7	47	3
Платформи керування даними	7,24	126,1	87	8

У табл. 3 представлено середньозважене значення часу передавання для файлу розміром 1 МБ. Вартість розраховано на основі моделі ціноутворення AWS [25], де було враховано витрати на зберігання, на екземпляри та на запити. У таблиці представлено середньозважене значення за 1 ТБ. Зусилля впровадження визначено на основі думки експертів з області розробки. Даний параметр визначено як кількість годин, необхідних розробникам для розгортання даного підходу. Безпековий параметр визначений як сума ваг, які було призначено кожній технології на основі параметрів управління ідентифікацією та доступом, шифрування, логування та моніторингу.

Суть методу TOPSIS полягає у виборі тієї альтернативи, яка є найближчою до ідеальної. Першим кроком для цього є побудова матриці на основі результатів описаних вище експериментів. Маємо три альтернативи (Apache Libcloud, S3Proху, Apache NiFi) і чотири критерії (Середня продуктивність, Середня вартість за ТБ, Зусилля впровадження і Безпека), тобто початкова матриця матиме вигляд табл. 3.

Таблиця 4 – Нормалізовані параметри

Підхід	Середня продуктивність, с	Середня вартість за ТБ, USD	Зусилля впровадження, людино-години	Безпека (вагові коефіцієнти)
Хмарно-незалежні бібліотеки	0,037	0,556	0,437	0,331
Мультихмарні шлюзи зберігання даних	0,047	0,577	0,428	0,331
Платформи керування даними	0,998	0,598	0,791	0,883

Таблиця 5 – Нормалізована зважена матриця для академічного підходу

Підхід	Середня продуктивність, с	Середня вартість за ТБ, USD	Зусилля впровадження, людино-години	Безпека (вагові коефіцієнти)
Хмарно-незалежні бібліотеки	0,004	0,222	0,131	0,066
Мультихмарні шлюзи зберігання даних	0,005	0,231	0,128	0,066
Платформи керування даними	0,100	0,239	0,237	0,177

Таблиця 6 – Нормалізована зважена матриця для корпоративного підходу

Підхід	Середня продуктивність, с	Середня вартість за ТБ, USD	Зусилля впровадження, людино-години	Безпека (вагові коефіцієнти)
Хмарно-незалежні бібліотеки	0,007	0,222	0,044	0,099
Мультихмарні шлюзи зберігання даних	0,009	0,231	0,043	0,099
Платформи керування даними	0,200	0,239	0,079	0,265

Далі визначаємо за формулою 8 найкраще і найгірше рішення (табл. 7).

Таблиця 7 – Значення кращого і гіршого варіантів

Підхід	P	C	IE	S
V_{acad}^+	0,004	0,224	0,128	0,177
V_{acad}^-	0,100	0,237	0,237	0,066
V_{corp}^+	0,007	0,224	0,043	0,265
V_{corp}^-	0,200	0,237	0,079	0,099

Наступний крок – нормалізація матриці (табл. 4), наведеної у табл. 3:

$$r_{i,j} = \frac{a_{i,j}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{ik}^2}} \quad (6)$$

де a_{ij} – значення елементів початкової матриці, r_{ij} – нормалізоване значення.

Призначаємо ваги критеріїв у відповідності до визначених раніше пріоритетів: найвищому пріоритету буде відповідати вища вага. Наприклад, для академії вартість є найбільш важливою, тому $W_C=0,4$. Найменш важливою є продуктивність, тому $W_P=0,1$. При цьому сума ваг має дорівнювати 1. Розподілимо ваги таким чином.

Для академічних рішень: $W_P=0,1; W_C=0,4; W_{IE}=0,3; W_S=0,2$ (табл. 5).

Для корпоративних рішень: $W_P=0,2; W_C=0,4; W_{IE}=0,1; W_S=0,3$ (табл. 6).

Обчислюємо значення нормалізованої зваженої матриці за формулою:

$$v_{ij} = W_i * r_{ij}, \quad (7)$$

Для параметру швидкодії, вартості і зусиль впровадження обираємо найменше значення, для безпеки – найбільше.

Вибір значень робимо з табл. 5 і 6.

$$V^+ = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+), V^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-). \quad (8)$$

Відстань до найкращого і найгіршого рішення визначається за формулами:

$$E_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}; \quad (9)$$

$$E_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} . \quad (10)$$

Визначаємо відносну близькість кожної альтернативи до ідеального рішення:

$$R_i^* = \frac{E_i^-}{E_i^+ + E_i^-} \quad (11)$$

Чим більше значення R_i^* , тим краще альтернатива. Отримуємо значення, наведені у табл. 8.

Таблиця 8 – Результати

Підхід	R_{acad}^*	Ранг	R_{corp}^*	Ранг
Хмарно-незалежні бібліотеки	0,566	2	0,542	1
Мультихмарні шлюзи зберігання даних	0,567	1	0,539	2
Платформи керування даними	0,431	3	0,458	3

З табл. 8 видно, що для академічних рішень мультихмарні шлюзи зберігання даних мають найбільше значення, тому їм надається перший пріоритет, на другому місці – хмарно-незалежні бібліотеки і останнє місце залишається за платформами керування даними. Для корпоративних рішень бачимо, що найкращий результат мають хмарно-незалежні бібліотеки, далі мультихмарні шлюзи зберігання даних

Таблиця 9 – Матриця порівнянь для продуктивності

Підхід	Хмарно-незалежні бібліотеки	Мультихмарні шлюзи зберігання даних	Платформи керування даними
Хмарно-незалежні бібліотеки	0,007	0,222	0,044
Мультихмарні шлюзи зберігання даних	0,009	0,231	0,043
Платформи керування даними	0,200	0,239	0,079

Таблиця 10 – Матриця альтернатив для академічних рішень

Критерій	Продуктивність	Вартість	Зусилля впровадження	Безпека
Продуктивність	1	1/4	1/3	1/2
Вартість	4	1	2	3
Зусилля впровадження	3	1/2	1	2
Безпека	2	1/3	1/2	1

Таблиця 11 – Матриця альтернатив для корпоративних рішень

Критерій	Продуктивність	Вартість	Зусилля впровадження	Безпека
Продуктивність	1	1/3	2	1/2
Вартість	3	1	4	2
Зусилля впровадження	1/2	1/4	1	1/3
Безпека	2	1/2	3	1

Таблиця 12 – Вектори пріоритетів для академічних і корпоративних рішень

Підхід	Академічне рішення	Ранг	Корпоративне рішення	Ранг
Хмарно-незалежні бібліотеки	0,3132	3	0,3058	3
Мультихмарні шлюзи зберігання даних	0,3715	1	0,3072	2
Платформи керування даними	0,3153	2	0,3869	1

На основі проведеного аналізу методом АНР кращим вважається варіант із найвищим балом. Згідно з оцінками, вектор пріоритету для академічних завдань становить [0,3132 0,3715 0,3153]. Таким чином, багатохмарні шлюзи сховищ стають оптимальним вибором для академічних установ. Вектор пріоритету для корпоративних завдань становить [0,3058

і найгірший результат знову показали платформи керування даними.

Результати експерименту

Аналіз отриманих результатів. Отримані результати методом TOPSIS показують, що для академічних рішень найкращим підходом є мультихмарні шлюзи зберігання даних. Для корпоративних рішень це хмарно-незалежні бібліотеки. Втім, обидва ці підходи мають зовсім невеликий розрив. Найгірший показник мають платформи керування даними.

У дослідженні [17] вже було розглянуто створення багатокритеріальної моделі методом АНР – аналітичний процес ієрархії, тому нижче наведено дані, необхідні для побудови моделі для академічних і корпоративних рішень. У цьому методі для кожного критерію необхідно створити порівняльні матриці. Для цього використовується шкала від 1 до 9. Чим краща альтернатива, тим більшу вагу вона отримує. Рівні альтернативи отримують 1 [26]. Наприклад, матриця порівнянь продуктивності для наведених даних має вигляд, наведений у табл. 9. Для корпоративних і академічних рішень визначимо матриці альтернатив (табл. 10, 11). Після цього розраховуємо вектор пріоритетів для визначення рангу підходів.

0,3072 0,3869], що вказує на те, що DMP є кращим варіантом для таких середовищ.

Порівняння результатів MCDA/АНР і MCDA/TOPSIS

Зведемо ранжування за обома методами у табл. 13, 14.

Таблиця 13 – Порівняння результатів ранжування підходів для академічних рішень за методами TOPSIS та АНР

Підхід	Ранг TOPSIS	Ранг АНР
Хмарно-незалежні бібліотеки	2	3
Мультихмарні шлюзи зберігання даних	1	1
Платформи керування даними	3	2

Таблиця 14 – Порівняння результатів ранжування підходів для корпоративних рішень за методами TOPSIS та АНР

Підхід	Ранг TOPSIS	Ранг АНР
Хмарно-незалежні бібліотеки	1	3
Мультихмарні шлюзи зберігання даних	2	2
Платформи керування даними	3	1

З табл. 13 видно, що обидва методи показали мультихмарні шлюзи зберігання даних як найкращий результат для академічних рішень, щодо ранжування інших підходів – результати розійшлися.

Для корпоративних рішень підхід хмарно-незалежних бібліотек методом TOPSIS показав найкращий результат, в той час як за АНР варто надати перевагу платформам керування даними. Друге місце за обома методами посідають мультихмарні шлюзи зберігання даних.

Згідно з [19] АНР має досить великий час розрахунків і сильний суб'єктивний вплив, у той час як TOPSIS простіший у реалізації і має менший суб'єктивний вплив на результати. Практичні дослідження підтверджують це, створюючи відповідні моделі для корпоративних і академічних рішень.

Маючи набір альтернатив $A = \{CAL, SG, DMP\}$ і критеріїв $CR = \{C, P, S, IE\}$, формалізуємо дану предметну область, запропонувавши онтологічну модель для формування найкращих стратегій вибору мультихмарних підходів.

Побудова онтологічної моделі

Дослідивши різні методи мультихмарної взаємодії, побудуємо онтологічну модель [27, 28], яка дозволить наочно показати основні поняття і зв'язки вказаної предметної області, та спростити процес формування сценарію вибору найкращого стеку технологій для побудови мультихмарного середовища під умови конкретного підприємства.

Онтологія має різноманітні форми представлення, при цьому складається з ієрархічного опису концептів [29]. Представлення онтології у вигляді орієнтованого графа дозволяє одночасно відображати велику кількість об'єктів і зв'язків між ними [30].

Вузли графа представляють ключові концепції або сутності, зокрема багатохмарні підходи, критерії, значення векторів пріоритетів. Стрілки вказують на зв'язки або взаємодію між поняттями.

Кожен вузол перетікає від однієї сутності до іншої. Параметри утворюють ієрархію оцінювання, де підходи знаходяться на одному рівні, а критерії і очікувана оцінка на інших.

Виходячи з отриманих моделей багатокритеріального аналізу для корпоративних і академічних рішень у зв'язках онтології проставлено ваги пріоритетів критеріїв.

Представимо онтологію у вигляді:

$$O = \langle C, A, V, I, R \rangle, \quad (9)$$

де C – набір усіх ключових сутностей або концепцій (концептуальні класи), залучених до процесу прийняття рішень щодо вибору багатохмарного підходу; у розглядуваному випадку це мультихмарні шлюзи зберігання даних, платформи керування даними та хмарно-незалежні бібліотеки:

$$C = \{CAL, SG, DMP\}, \quad (10)$$

де SG – мультихмарні шлюзи зберігання даних, DMP – платформи керування даними, CAL – хмарно-незалежні бібліотеки; при використанні інших підходів мультихмарної взаємодії набір C може бути розширено;

A – набір атрибутів і характеристик, що описують класи понять:

$$A = \{C, P, S, IE\}, \quad (11)$$

де C – вартість, P – продуктивність, S – безпека, IE – зусилля щодо впровадження;

V – результуючі значення у вигляді рангу пріоритетів:

$$V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}, \quad (12)$$

де V_1 – найвищий пріоритет, а V_n – найнижчий;

I – множина екземплярів класів, представляють набір варіантів мульти-хмарної взаємодії:

$$I = \{S3Proху, Apache NiFi, Apache Libcloud\}; \quad (13)$$

R – набір відношень між класами, які вказують на зв'язки або взаємодію між поняттями.

Кожен підхід оцінюється на основі його ефективності щодо кожного критерію, пов'язуючи їх із потенційними результатами.

У представленій онтології можна виділити такі зв'язки:

1. Відношення між концепціями та екземплярами $R(C_i, I_j)$, де кожен екземпляр I_j пов'язаний з концепцією C_i .

2. Відношення між екземплярами та атрибутами $R(I_i, A_j) \rightarrow V_k$, де для кожного екземпляра I_i (наприклад, S3Proху) існує відношення з атрибутами A_j (наприклад, вартість C , продуктивність P тощо), що призводить до оцінки V_k (результуючого значення).

3. Відношення між атрибутами та результатами $R(A_i, V_j)$ відображають зв'язок між кри-

теріями та відповідними результатами ранжування або пріоритетами.

На рис. 1 представлена описана онтологія у вигляді орієнтованого графу. Верхній рівень вузлів являє собою класи мультимарних підходів. Наступний рівень відображає конкретні технології. Далі йде рівень оціночних критеріїв. Останній рівень відображає результати.

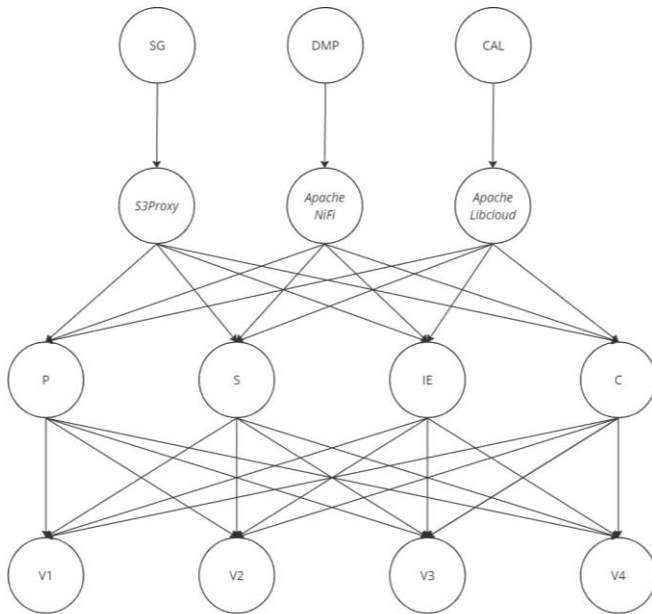


Рис. 1. Онтологічна модель вибору мультимарного підходу

Таким чином, дана модель узагальнює відомості, необхідні для вибору мультимарного підходу. Більш того, дану модель можна розширити на кожному ієрархічному рівні, де можна додати інші мультимарні стратегії та критерії.

Бізнес-процес оцінки альтернативних рішень на основі онтологічної моделі можна розділити на такі етапи:

1. Визначення мети і вибір концепцій під конкретний сценарій.
2. Визначення критеріїв оцінки. В описаній моделі - це продуктивність, безпека, зусилля впровадження і вартість.
3. Ранжування альтернатив на основі оцінок.

4. Для кожної альтернативи проводиться оцінка по вказаним критеріям.

5. Ранжування альтернатив на основі оцінок.

6. Прийняття рішення щодо впровадження конкретного підходу.

Використання онтології дозволяє охопити важливі аспекти прийняття рішення, спрощено і наочно візуалізувати процес оцінки, а також визначитися з гнучким сценарієм формування набору інструментарію для реалізації мультимарного доступу в конкретній організації.

Висновки

Дана робота аналізує методи мультимарної взаємодії з метою побудови гнучкого сценарію формування набору інструментарію для реалізації мультимарного доступу в конкретній організації, для чого застосовано методи багатокритеріальної оптимізації та онтологічна модель.

Виходячи з результатів багатокритеріального аналізу на основі методів АНР і TOPSIS, отримано такі результати: мультимарні шлюзи зберігання даних найкраще підходять для академічних рішень, в той час як для корпоративних рішень більше підходять хмарно-незалежні бібліотеки і платформи керування даними.

Визначено групу технологій для мультимарної взаємодії на основі методів TOPSIS і АНР, що дозволяє зробити висновки:

– метод АНР є більш трудомістким (потрібен великий час для побудови і розрахунків) і дуже чутливим до користувацьких налаштувань,

– метод TOPSIS набагато простіший в реалізації, при цьому результати набагато менш чутливі до користувацьких рішень.

У подальших дослідженнях планується зробити аналогічний аналіз для динамічного розподілу обчислювального навантаження у мульти-клауд системах.

Підсумком роботи є узагальнення мультимарних підходів і зв'язків з їх параметрами, представлене у вигляді онтологічної моделі, що дозволяє підприємствам підвищити ефективність отриманих технічних рішень щодо мультимарної взаємодії, дає можливість автоматизованим шляхом проводити оцінку альтернативних рішень на основі статистичної інформації, яка визначає наявний досвід роботи в різних хмарних середовищах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. “Flexera 2024 State of the Cloud Report,” Accessed on: 15.04.2024. [Online]. Available: <https://info.flexera.com/CM-REPORT-State-of-the-Cloud>.
2. J. Carvalho, D. Vieira, and F. Trinta, “Dynamic Selecting Approach for Multi-cloud Providers,” in *Cloud Computing – CLOUD 2018*, M. Luo and L. J. Zhang, Eds., Cham: Springer, 2018, vol. 10967, Lecture Notes in Computer Science, https://doi.org/10.1007/978-3-319-94295-7_3.
3. P. Wang, C. Zhao, W. Liu, Z. Chen, and Z. Zhang, “Optimizing Data Placement for Cost-Effective and High Available Multi-Cloud Storage,” *Computing and Informatics*, vol. 39, pp. 51–82, 2020. doi: 10.31577/cai20201-251.
4. J. Alonso, L. Orue-Echevarria, V. Casola, and et al., “Understanding the challenges and novel architectural models of multi-cloud native applications – a systematic literature review,” *J. Cloud Computing*, vol. 12, p. 6, 2023. <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00367-6>.
5. M. Boch et al., “A Systematic Review of Data Management Platforms,” in *Information Systems and Technologies*, A. Rocha, H. Adeli, G. Dzemyda, and F. Moreira, Eds., Cham: Springer, 2022, vol. 469, Lecture Notes in Networks and Systems, https://doi.org/10.1007/978-3-031-04819-7_2.

6. H. A. Imran et al., "Multi-Cloud: A Comprehensive Review," in *2020 IEEE 23rd International Multitopic Conference (INMIC)*, Bahawalpur, Pakistan, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/INMIC50486.2020.9318176.
7. S. Tu, "Multicloud Connectivity: A Complete Guide," Megaport, 2022. [Online]. Available: <https://www.mega-port.com/blog/multicloud-connectivity-complete-guide/>
8. "Why Do Companies Use Multi-Cloud?" [Online]. Available: <https://prosimo.io/why-do-companies-use-multi-cloud/>.
9. N. S. Kravets and M. S. Chernyshov, "Problems of Multi-Cloud Solutions Deploying and Managing," *Bionika Intellekta*, no. 1(96), pp. 63–68, 2021. doi: 10.30837/bi.2021.1(96).10. [Online]. Available: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/7ffc0f49-0a95-4228-8bc4-5d0cbcab6fed/content>.
10. "Terraform Docs Overview," [Online]. Available: <https://developer.hashicorp.com/terraform/docs>.
11. "Apache Libcloud," Libcloud. [Online]. Available: <https://libcloud.apache.org/>.
12. "Cloud Storage Gateway," *Techopedia*, Accessed on: 25.04.2024. [Online]. Available: <https://www.techopedia.com/definition/26537/cloud-storage-gateway>.
13. "The Top 7 Cloud Storage Gateway Solutions," [Online]. Available: <https://expertinsights.com/insights/top-cloud-storage-gateway-solutions/>.
14. O. Tomarchio, D. Calcaterra, and G. D. Modica, "Cloud resource orchestration in the multi-cloud landscape: a systematic review of existing frameworks," *J. Cloud Computing*, vol. 9, p. 49, 2020. <https://doi.org/10.1186/s13677-020-00194-7>.
15. "What is Data Management Platform (DMP)?" *Oracle*. [Online]. Available: <https://www.oracle.com/cx/marketing/data-management-platform/what-is-dmp/#how-to-choose-the-right-dmp>.
16. M. Farid, H. S. Lim, C. P. Lee, and R. Latip, "Scheduling Scientific Workflow in Multi-Cloud: A Multi-Objective Minimum Weight Optimization Decision-Making Approach," *Symmetry*, vol. 15, no. 2047, 2023. <https://doi.org/10.3390/sym15112047>.
17. A. Cacerec, L. Globa, "AHP-driven multi-criteria analysis of multi-cloud data management techniques", unpublished.
18. M. Aruldoss, T. M. Lakshmi, and V. P. Venkatesan, "A Survey on Multi Criteria Decision Making Methods and Its Applications," *American Journal of Information Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 31-43, 2013. doi: 10.12691/ajis-1-1-5.
19. A. Buriachenko and N. Kuts, "Multi-Criterion Analysis Methods," *ResearchGate*, 2021. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/348774582_MULTI-CRITERION_ANALYSIS_METHODS.
20. V. S. Korendovych, "Application of Multi-Criteria Analysis for Priority Selection," *Journal: Collection of the Scientific Papers of the Centre for Military and Strategic Studies of the National Defence University of Ukraine*, no. 2-60, pp. 129-136, 2018. doi: 10.33099/2304-2745/2017-2-60/129-136.
21. M. Hanine, O. Boutkhoul, A. Tikniouine, and et al., "Application of an Integrated Multi-Criteria Decision Making AHP-TOPSIS Methodology for ETL Software Selection," *SpringerPlus*, vol. 5, p. 263, 2016. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-1888-z>.
22. Crayon. [Online]. Available at: <https://www.crayon.com>.
23. Nordcloud. [Online]. Available at: <https://nordcloud.com>.
24. Tech-5. [Online]. Available at: <https://tech-5.de>.
25. AWS, 2024. *AWS Prices*. Available at: https://aws.amazon.com/ru/pricing/?aws-products-pricing.sort-by=item.additional-fields.productNameLowercase&aws-products-pricing.sort-order=asc&awsf.Free%20Tier%20Type=*all&awsf.tech-category=*all
26. I. Linkov and E. Moberg, *Multi-Criteria Decision Analysis: Environmental Applications and Case Studies*. Accessed on: 08.05.2024. [Online]. Available: https://books.google.pl/books?hl=uk&lr=&id=LqdH2G6xk1AC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Multiple+Criteria+Decision+Analysis&ots=rqQXIy452V&sig=fFSu7G4k4Lnxv55eO3dRQSWBarI&redir_esc=y#v=onepage&q=Multiple%20Criteria%20Decision%20Analysis&f=false.
27. A. Y. Gladun and K. O. Khala, "Computer Means, Networks, and Systems," *Kzms*, no. 18, pp. 5-10, 2019. [Online]. Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kzms_2019_18_3.
28. A. A. Kosolapov and Y. O. Pshinko, "Ontological Models in the Problems of Automation of Sorting Stations," *Artificial Intelligence*, no. 4, pp. 344–352, 2013. [Online]. Available: <http://dSPACE.nbuv.gov.ua/handle/123456789/85188>.
29. O. V. Zakharova, "Basic Principles for the Construction of Ontological Graph-Oriented Description of the Application Area," *Problemy Programuvannia*, no. 4, pp. 51-59, 2010. [Online]. Available: http://dSPACE.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/50356/6_s_51-59.pdf?sequence=1.
30. S. Haiko and V. Prykhodniuk, "Representation of Educational Resources as Interactive Documents," in *Proceedings of the XII International Scientific-Practical Conference «INTERNET-EDUCATION-SCIENCE» (IES-2020)*, Ukraine, Vinnytsia, 26-29 May 2020, pp. 249–251. Vinnytsia: VNTU, 2020.

Received (Надійшла) 12.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.11.2024

A multi-criteria and ontology-based approach to multi-cloud environment selection

Anton Caseres, Larysa Globa

Abstract. Today, multi-cloud environments for data storage and processing have become a standard practice worldwide. Each cloud provider offers own unique solutions, making it challenging for end users to select a service provider, as they aim to maximize efficiency while minimizing costs. This paper explores multi-cloud paradigms, including multi-cloud storage gateways, data management platforms, and cloud-agnostic libraries. The study uses multicriteria decision analysis (MCDA) with AHP and TOPSIS methods to identify the optimal approach for corporate and academic applications, based on criteria such as cost, implementation effort, security, and performance. Additionally, an ontological model is proposed to create a flexible framework for selecting multi-cloud approaches. This model leverages weighting factors derived from practical experiments using AHP and TOPSIS, focusing on the specific requirements of multi-cloud environments in corporate and academic contexts. The model provides the most effective strategies for combining cloud services based on particular application scenarios.

Keywords: cloud computing, multi-cloud, data interoperability, MCDA, ontological model.

Г. К. Кожевніков, М. І. Маркевич, О. Ю. Матяш

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

ТЕХНОЛОГІЯ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ ВУЗЛАМИ ГРАНИЧНОГО ШАРУ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Анотація. **Актуальність.** Все більшу популярність у різних галузях на сьогодні отримують системи Інтернету речей (IoT). Для обробки інформаційних потоків, що надходять з великої кількості кінцевих датчиків застосовується хмарна технологія. Але при надходженні до хмари оперативних транзакцій недотримуються вимоги QoS. Вирішенню даної проблеми сприяло появлення на граничному шарі Інтернету речей одноплатних комп'ютерів, **Мета статті** – вибір технології взаємодії між вузлами граничного шару Інтернету речей, яка орієнтована на обмежені обчислювальні ресурси вузлів, що наближені до датчиків IoT. **Результати дослідження.** Проведений аналіз характеристики існуючих технологій взаємодії обчислювальних вузлів нижнього шару Інтернету речей, виділені переваги та недоліки кожної технології. В результаті в якості базової обрано технологію віддаленого виклику процедур. Проведено моделювання процесу призначення завдань на нижньому шарі Інтернету речей з використанням обраної технології. **Висновок.** Запропонований підхід до організації взаємодії обчислювальних вузлів нижнього шару Інтернету речей з використанням технології віддаленого виклику процедур дозволив виконати вимоги QoS до оперативних транзакцій IoT.

Ключові слова: Інтернет речей, туманні обчислення, хмарна система, граничні обчислення.

Вступ

На сьогодні стрімкого розвитку набула концепція Інтернету речей (IoT) [1–3]. Основною обчислювальною платформою, на якій базується IoT, є хмарна платформа, доступ до якої пристрої Інтернету речей отримують через мережу Інтернет [4]. Але при надходженні до хмарної платформи оперативних транзакцій IoT виникає проблема недотримання вимог QoS, пов'язана з великими часовими затримками при передачі даних до хмари [5].

Вирішенню даної проблеми сприяло появлення на граничному шарі Інтернету речей одноплатних комп'ютерів, які, хоч і мають обмежені обчислювальні потужності, але можуть виконати деякі з оперативних завдань, не посилаючи їх до хмарних центрів обробки даних [6]. При цьому використання граничних обчислень потребує впровадження технології, яка буде орієнтована на локальну розподілену мережу одноплатних комп'ютерів [7–9].

Мета дослідження – вибір технології взаємодії між вузлами граничного шару Інтернету речей, яка орієнтована на обмежені обчислювальні ресурси вузлів, що наближені до датчиків IoT.

1. Характеристики існуючих технологій взаємодії обчислювальних вузлів нижнього шару Інтернету речей

1.1 Сокети. Передача даних між розподілюючим вузлом (сервером) і обчислювальним вузлом (клієнтом) може бути реалізовано на основі сокетів, програмних інтерфейсів, що забезпечують обмін даними між двома застосунками.

У серверній програмі створюється метод-заглушка (stub-method), котрий виконується у випадку надходження повідомлення від клієнта, а потім передає управління функції, що реалізує обчислювальний примітив. Робота алгоритму ґрунтується на тому, що клієнт створює сокет та відкриває його на з'єднання з сервером, а потім відправляє в нього повідомлення (message = "m"), яке відповідає обчислювальному

примітиву та переданим йому параметрам на сервері, який необхідно виконати.

Серверна частина програми створює серверний сокет, який чекає підключення по певному порту і, у разі успішного підключення з боку клієнта, серверний сокет повертає звичайний сокет. З отриманим сокетом зв'язується вхідний потік. Використовуючи буферизоване читання серверний застосунок зчитує надіслане повідомлення. Потім сервер аналізує повідомлення, ставить йому у відповідність обчислювальний примітив і передає параметри.

Для реалізації зворотної взаємодії, коли повідомлення надсилаються від обчислювального вузла до вузла розподілення завдань, клієнтська та серверна частини міняються місцями.

1.2 Віддалений виклик процедур. Віддалений виклик процедур в Java реалізований в вигляді технології RMI (віддалений виклик методу – Remote Method Invocation). Ця технологія дозволяє здійснювати взаємодію між об'єктами, розташованими на різних віртуальних машинах.

Для організації взаємодії через RMI у розподіленій обчислювальній інфраструктурі (POI) IoT необхідно створити інтерфейс, в якому будуть описані прототипи всіх необхідних обчислювальних примітивів, що можуть викликатися клієнтом і які будуть реалізовані на сервері.

Даний інтерфейс повинен бути доступним і клієнту і серверу, оскільки на стороні сервера він буде реалізований (implemented) у вигляді класу Server, а зі сторони клієнта він буде представлений у вигляді Proxy. Клас Server реалізує всю функціональність серверної частини обчислювальної системи, всі функції, що відповідні обчислювальним примітивам. Примірник класу Server забезпечує віддалений доступ. Служба найменування Naming забезпечує універсальне найменування пристроїв IoT і пошук віддалених об'єктів на шині RMI, для чого використовується реєстрація в реєстрі (Registry), куди передається ім'я, задане розробником, і безпосередньо сам екземпляр класу Server.

У клієнтському застосунку створюється об'єкт, описаний інтерфейсом серверу, і віддалений об'єкт для доступу, що запитується в службі Naming за його іменем, заданим на етапі реєстрації на серверному застосунку.

1.3 Технологія CORBA (Common Object Request Broker Architecture). Дана технологія дозволяє здійснити взаємодію програмного коду, написаного різними мовами з допомогою платформонезалежного мови описи IDL (Interface Description Language, мова описи інтерфейсу). Уніфікація технології CORBA здійснюється у відповідність до стандарту OMG (Object Management Group) та призначена для реалізації розподілених програм. За аналогією з RMI технологія CORBA також має «шину», на якій здійснюється реєстрація і пошук віддалених об'єктів.

Інші особливості технології CORBA аналогічні RMI, але дозволяє використовувати кілька мов програмування при реалізації розподіленої програми, що підвищує складність її використання і розгортання.

2. Переваги та недоліки наведених технологій

Кожна з описаних технологій має свої переваги та недоліки, які необхідно враховувати під час розробки розподіленої обчислювальної інфраструктури Інтернету речей.

До переваг сокетів можна віднести таке:

- простота використання і реалізації;
- за рахунок відсутності прив'язки до платформ сокети дозволяють взаємодіяти застосункам, написаним на різних мовах програмування;
- технологія сокетів реалізована на практично всіх платформах (у тому числі в мінімальній вбудованій платформі для розробки мобільних застосунків Java ME).

Недоліки технології сокетів наступні:

- у застосунку мають бути підпрограми, які забезпечують обробку вхідних повідомлень;
- відсутність системи найменування та реєстрації об'єктів, що ускладнює реалізацію роботи з пристроями Інтернету речей;
- для серверної програми необхідно налаштувати кілька портів (вхідний та вихідний) для забезпечення двосторонньої взаємодії, а також такий набір портів необхідний для кожного віддаленого пристрою IoT.

До переваг технології RMI можна віднести наступне:

- простота реалізації на платформі Java;
- програмна шина для реєстрації і пошуку віддалених об'єктів (можлива реєстрація самих серверних та клієнтських застосунків як віддалених об'єктів);
- не потрібне використання окремих застосунків мов для опису віддалених об'єктів.

До негативних сторін технології RMI можна віднести наступне:

- технологія є частиною платформи Java, тому взаємодія з застосунками, написаними на інших мовах і реалізованих на інших платформах, ускладнюється;

- не входить по замовчуванню в платформу розробки вбудованих застосунків Java ME (потрібно попереднє встановлення відповідних бібліотек).

Що стосується розробки PICIB технологія CORBA має такі переваги:

- можливість розробки застосунків з використанням різних мов програмування і програмних платформ;
- технологія є відкритою і стандартизована OMG;
- наявність програмної шини для реєстрації та пошуку віддалених компонентів.

До недоліків технології CORBA можна віднести таке:

- складність реалізації і розгортання розподілених застосунків;
- для кожної платформи повинен бути розроблений окремий застосунок для реалізації програмної шини;
- необхідність опису віддалених компонентів окремою мовою IDL, яка не є частиною якоїсь іншої мови програмування.

3. Вибір технології взаємодії обчислювальних вузлів нижнього шару Інтернету речей

Оскільки для реалізації розподіленої обчислювальної інфраструктури Інтернету речей найбільш прийнятним варіантом є використання платформи Java та відповідної мови програмування, то в даному випадку можливо використання всіх технологій, які забезпечують взаємодію застосунків, оскільки вони є в стандартних бібліотеках Java.

Використання інших, більш складних технологій, таких як Spring або Enterprise Java Beans (EJB), взаємодії компонентів обчислювальної інфраструктури Інтернету речей не має сенсу тому, що вони створені для розробки корпоративних застосунків і в жодному вигляді не можуть бути використані при роботі на малопотужних пристроях IoT (наприклад, самі бібліотеки програмних компонентів вимагають сотні мегабайт постійної пам'яті).

Підхід, заснований на використанні сокетів, вимагає у деяких випадках розробки додаткового програмного коду:

- для обробки вхідних повідомлень,
- для забезпечення адресації і найменування віддалених об'єктів.

Таким чином, виникає ситуація, що все, що є за замовчуванням у технологіях RMI або CORBA, розробнику доведеться реалізовувати самостійно, це означає відмову від використання сокетів при реалізації розподіленої обчислювальної інфраструктури Інтернету речей.

У технології CORBA є безліч можливостей, що забезпечує її універсальність, але при цьому також збільшується і складність розробки програмного забезпечення для розподіленої обчислювальної інфраструктури Інтернету речей.

Мультиплатформність CORBA може бути суттєвим перевагою для реалізації на гетерогенних обчислювальних вузлах, але оскільки передбачається

наявність віртуальної машини Java на всіх пристроях, то вказана перевага втрачає свій сенс.

RMI має усі переваги CORBA, але є частиною платформи Java, де передбачається реалізація розподіленої обчислювальної інфраструктури Інтернету речей. В даному випадку, технологія RMI має простішу реалізацію, ніж конкуруючі технології, а також вона розвивається разом з платформою Java, стаючи все більше простою для розробників. Таким чином, універсальність мови Java дозволяє розробляти програми для широкого класу пристроїв, а наявність віртуальної машини JVM для операційної системи GNU/Linux дозволяє реалізовувати програмний код для елементів розподіленої обчислювальної інфраструктури Інтернету речей, в основі якого буде лежати технологія RMI.

У результаті, реалізацію розподілених застосунків для забезпечення функціонування частин розподіленої обчислювальної інфраструктури Інтернету речей проаонується здійснювати на нативній технології платформи Java - RMI.

4. Моделювання процесу призначення завдань на нижньому шарі Інтернету речей

На сьогоднішній день існує цілий ряд алгоритмів розподілу завдань по вузлам розподіленою обчислювальної системи [10–17]. Істотна частина алгоритмів припускає, що структура обчислювальної системи не буде змінюватися під час роботи, тому можливі методи статичного оптимального (субоптимального) розподілу завдань. Показниками оцінки роботи алгоритму для всіх досліджень є такі, що засновані на його середній поведінці, наприклад:

- середні значення продуктивності (Mean rate);
- функції винагороди (Mean reward);
- функція втрат (Mean regret), зворотна функція до функції винагороди.

Дані показники описують в принципі оптимальність обраної агентом стратегії.

Для дослідження показники доповнюються часом виконання завдання в залежності від числа вузлів і розміру вхідних файлів.

У якості розв'язуваного завдання вибирається завдання, що має високий рівень розпаралелювання, при цьому необхідно врахувати, що завдання (обчислювальні примітиви) повинні бути однаковими по обчислювальній складності та кількості переданих даних. Також на обчислювальних вузлах повинна бути однаковою реалізація обчислювального модуля, з метою зменшення впливу характеристик апаратної платформи на підсумкову оцінку роботи алгоритму.

Дослідження поведінки алгоритму при стаціонарному стані проводилось при таких умовах:

- один розподілюючий вузол в розподіленій обчислювальній інфраструктурі Інтернету речей;
- в процесі роботи алгоритму на всіх ітераціях розподілюючий вузол не змінюється;
- кількість обчислювальних вузлів на нижньому шарі Інтернету речей постійна і не змінюється у часі;
- інтегральні характеристики обчислювальних вузлів нижнього шару Інтернету речей постійні, тобто значення винагород постійні;

– параметр ϵ , що характеризує частину випадкових призначень, для кожного експерименту приймає єдине значення із множини $E = [0; 0,001; 0,05; 0,25; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 1]$ і зберігає це значення на протязі роботи однієї ітерації алгоритму; під ітерацією приймається призначення всіх задач одного завдання обчислювальним вузлам нижнього шару Інтернету речей.

У статичному режимі структура та поведінка обчислювальних вузлів не змінюється, тому під час взаємодії розподілюючого вузла з обчислювальними вузлами повертається постійне значення винагороди.

Для оцінки процедури призначення завдань у використовується варіант алгоритму багаторукого бандита, у якого параметри ймовірностей вибору дії залишаються незмінними. Параметр ϵ визначає баланс між режимами дослідження та експлуатації. В даному випадку не важливо, яке завдання вирішуватиметься і які параметри ϵ у обчислювальних вузлів. Основною умовою є те, що в кожному експерименті ці параметри були однаковими.

На діаграмі рис. 1 показано значення винагороди, одержуване агентом при виборі 20 дій та вибраних значеннях параметра ϵ : перемикання моделі призначення завдань від стадії дослідження до стадії використання та вибору дії з проводиться з максимально можливою вигодою.

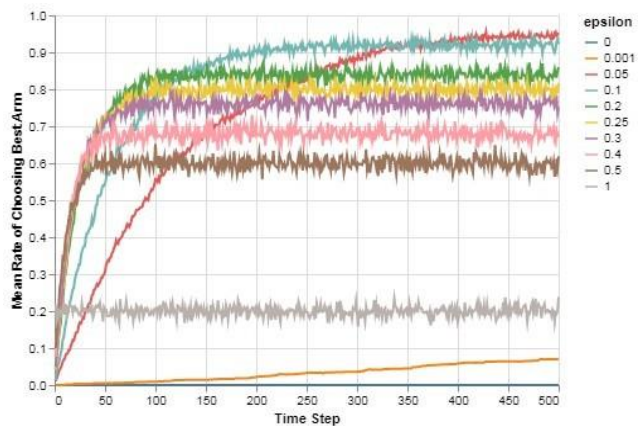


Рис. 1. Середня швидкість досягнення оптимальної стратегії вибору найкращого дії при 1000 симуляціях

Результати, показані на рис. 1, демонструють, що значення середньої винагороди із часом досягає деякого стабільного значення, тобто процедура призначення буде в результаті давати стабільну якість розподілу завдань.

Збільшення параметра ϵ призводить до того, що алгоритм робить більше спроб дослідження та менше спроб експлуатації, тобто агент намагається досліджувати навколишнє середовище більше, ніж отримувати від неї корисний результат: розподілюючий вузол постійно здійснює відправлення завдань на нові вузли, замість використання обчислювальних вузлів, характеристики яких йому відомі.

Висновки

У статті проведений аналіз характеристики існуючих технологій взаємодії обчислювальних вузлів

нижнього шару Інтернету речей, виделені переваги та недоліки кожної технології. В результаті в якості базової обрано технологію віддаленого виклику процедур. Проведено моделювання процесу призначення завдань на нижньому шарі Інтернету речей з

використанням обраної технології. Запропонований підхід до організації взаємодії обчислювальних вузлів нижнього шару Інтернету речей з використанням технології віддаленого виклику процедур дозволив виконати вимоги QoS до оперативних транзакцій IoT.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Schulz, A.S. (2023). User Interactions with Internet of Things (IoT) Devices in Shared Domestic Spaces. *ACM International Conference Proceeding Series*, 577–579. doi: <https://doi.org/10.1145/3626705.3632615>
- Chalapathi, G.S.S., Chamola, V., Vaish, A., Buyya, R. (2022). Industrial internet of things (Iiot) applications of edge and fog computing: A review and future directions. *Advances in Information Security*, 83, 293–325. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57328-7_12
- Petrovska, I., Kuchuk, H. (2023). Adaptive resource allocation method for data processing and security in cloud environment. *Advanced Information Systems*, 7(3), 67–73. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.10>
- Pardo, C., Wei, R., Ivens, B.S. (2022). Integrating the business networks and internet of things perspectives: A system of systems (SoS) approach for industrial markets. *Industrial Marketing Management*, 104, 258–275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2022.04.012>
- Zakharchenko, A., Stepanets, O. (2023). Digital twin value in intelligent building development. *Advanced Information Systems*, 7(2), 75–86. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.2.11>
- Li, G., Liu, Y., Wu, J., Lin, D., Zhao, Sh. (2019). Methods of Resource Scheduling Based on Optimized Fuzzy Clustering in Fog Computing. *Sensors*, MDPI, 19(9). doi: <https://doi.org/10.3390/s19092122>
- Qayyum, T., Trabelsi, Z., Waqar Malik, A., Hayawi, K. (2022). Mobility-aware hierarchical fog computing framework for Industrial Internet of Things. *Journal of Cloud Computing*, 11(1), 72. doi: <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00345-y>
- Zuev, A., Karaman, D., Olshevskiy, A. (2023). Wireless sensor synchronization method for monitoring short-term events. *Advanced Information Systems*, 7(4), 33–40. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.4.04>
- Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kacprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8
- Кучук Н. Г., Мерлак В. Ю., Скороделов В. В. Метод зменшення часу доступу до слабкоструктурованих даних. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Т. 4, № 1. С. 97-102. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.14>
- Kalaiselvi, P., Michael Jones, M., Muruges, S., Veerakumar, K., Prakash, N. (2023), Design And Implementation of Smart Billing System, 2023 International Conference on Sustainable Emerging Innovations in Engineering and Technology, ICSEIET 2023, страницы 212–218, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ICSEIET58677.2023.10303608>
- Кучук Г.А. Управління трафіком мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі / Г.А. Кучук // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НіУ, 2007. – Вип. 2. – С. 18-27.
- Кучук Г.А. Розрахунок навантаження мультисервісної мережі / Г.А. Кучук, Я.Ю. Стасєва, О.О. Болубаш // Системи озброєння і військова техніка. – 2006. – № 4 (8). – С. 130 – 134.
- Кучук Г. А., Можасєв О. О., Воробйєв О. В. Метод прогнозування фрактального трафіка. *Радіоелектронні та комп'ютерні системи*. 2006. № 6 (18). С. 181 - 188.
- Jayasuriya, D.B., Perera, I. (2019), Ontology Based Software Design Documentation for Design Reasoning, *MERCon 2019 - Proceedings, 5th International Multidisciplinary Moratuwa Engineering Research Conference*, pp. 710–715, 8818813, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/MERCon.2019.8818813>
- Худов В.Г., Кучук Г.А., Маковейчук О.М., Крижний А.В. Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптикоелектронного спостереження. *Системи обробки інформації*, 2016. Вип. 9 (146). С. 77-80.
- Gomathi, B., Saravana Balaji, B., Krishna Kumar, V., Abouhawwash, M., Aljahdali, S., Masud, M. and Kuchuk, N. (2022), "Multi-Objective Optimization of Energy Aware Virtual Machine Placement in Cloud Data Center", *Intelligent Automation and Soft Computing*, Vol. 33(3), pp. 1771–1785, doi: <http://dx.doi.org/10.32604/iasc.2022.024052>

Received (Надійшла) 20.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.11.2024

Interaction technology between nodes of the edge layer of the Internet of Things

H. Kozhevnikov, M. Markevych, O. Matyash

Abstract. Topicality. Internet of Things (IoT) systems are becoming increasingly popular in various industries today. Cloud technology is used to process information flows coming from a large number of end sensors. But when operational transactions enter the cloud, QoS requirements are not met. The solution to this problem was facilitated by the emergence of single-board computers at the edge layer of the Internet of Things. **The purpose of the article** is to selection of the technology for interaction between the nodes of the edge layer of the Internet of Things, which is focused on the limited computing resources of nodes close to IoT sensors. **Research results.** An analysis of the characteristics of existing technologies for interaction of computing nodes of the lower layer of the Internet of Things was conducted, the advantages and disadvantages of each technology were highlighted. As a result, the remote procedure call technology was chosen as the basic one. The process of assigning tasks at the lower layer of the Internet of Things was simulated using the selected technology. **Conclusion.** The proposed approach to organizing the interaction of computing nodes of the lower layer of the Internet of Things using remote procedure call technology made it possible to meet the QoS requirements for operational IoT transactions.

Keywords: Internet of Things, fog computing, cloud system, edge calculations.

О. І. Крюченков, О. І. Морозова, Т. С. Нікітіна

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

МОБІЛЬНІ ЛОГІСТИЧНІ ТА МОНІТОРИНГОВІ СИСТЕМИ НА БАЗІ РОЇВ БПЛА: ВИКЛИКИ ТА НАПРЯМИ РОЗВИТКУ

Анотація. Із розвитком технологій і активною цифровізацією аспектів життя від транспорту до торгівлі, зростає потреба у створенні надійних мобільних логістичних систем на базі роїв безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Застосування роїв БПЛА здатне суттєво підвищити ефективність логістичних і моніторингових операцій, забезпечуючи безпеку та оптимізуючи витрати завдяки збору та аналізу даних для прийняття рішень у реальному часі. Основною метою цієї статті є огляд методів і програмних засобів, що забезпечують надійну роботу мобільних логістичних і моніторингових систем на базі роїв БПЛА. Також розглядаються ключові сфери діяльності з прикладами їх застосування, характерними рисами, проблемами, обмеженнями та перевагами. Стаття також формулює загальні виклики та обмеження у цій галузі. У роботі пропонується концепція використання роїв БПЛА для вирішення логістичних та моніторингових завдань, що підвищують ефективність роботи та знижують ризик виникнення непередбачених ситуацій протягом життєвого циклу операцій. Виділяються три основні підходи до реалізації таких систем: автономні рої БПЛА, рої, керовані оператором, і гібридні системи. Крім того, розглядається застосування роїв БПЛА у різних сферах діяльності, таких як доставка товарів, моніторинг складів та інфраструктури, а також підтримка пошуково-рятувальних операцій. Концепція мобільних логістичних і моніторингових систем на базі роїв БПЛА може бути впроваджена майже у всіх галузях, але ця стаття зосереджена на найпоширеніших сферах, що суттєво вплинули на розвиток таких систем. Проведено аналіз основних галузей застосування роїв БПЛА, визначено особливості та проблеми їх використання у кожній із розглянутих сфер діяльності. Було узагальнено виклики, переваги та специфіку використання роїв БПЛА.

Ключові слова: рої БПЛА, мобільні логістичні системи, безпілотні літальні апарати, ефективність логістики, автономні системи управління, цифровізація логістики, обробка великих даних, безпека даних, стандартизація, відмовостійкість, оптимізація маршрутів.

Вступ

Сучасні логістичні системи стикаються з необхідністю адаптувати новітні технології для підвищення ефективності та надійності. Однією з ключових технологій, що сприяють цій революції, є рої безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які можуть виконувати складні задачі без втручання людини, знижуючи витрати та підвищуючи безпеку операцій.

Методи та програмні засоби для створення й використання гарантоздатних мобільних логістичних систем на базі роїв БПЛА спрямовані на підвищення ефективності логістичних процесів, зменшення витрат та підвищення надійності систем.

Рої БПЛА дозволяють створювати точні моделі фізичних об'єктів або процесів, які здатні збирати інформацію з реального середовища, виконувати перевірку та задачі в труднодоступних для людей місцях. Це допомагає приймати рішення в реальному часі для підвищення ефективності роботи.

Існують три основні підходи до моделювання: фундаментальне моделювання, моделювання на основі даних і гібридне моделювання. Інший аспект використання роїв БПЛА – це ієрархія їх застосування: від моделювання компонентів і обладнання до систем та процесів. Рої БПЛА можуть представляти прості сенсори або можуть об'єднувати та координувати роботу кількох виробничих підсистем..

Застосування роїв БПЛА в логістиці може відбуватися майже у всіх сферах діяльності, але основними галузями є транспорт, торгівля та промисловість.

У дослідженні, проведеному в 2019 році Joopuur Eup та колегами, був виконаний математичний аналіз стійкості логістичних систем, що базуються на використанні БПЛА. Це дослідження дозволило виділити

ключові параметри, які є критичними для забезпечення надійності таких систем [1]. Ідея використання роїв БПЛА у логістиці швидко набула популярності завдяки своїй здатності оптимізувати процеси доставки і значно зменшувати час на виконання завдань.

Концепція використання роїв БПЛА передбачає ієрархічну структуру, що включає компоненти, майно, системи та процеси. Рої БПЛА можуть бути використані як для виконання функцій простих сенсорів, так і для моделювання декількох виробничих підсистем одночасно. Це відкриває нові можливості для автоматизації та оптимізації логістичних операцій, забезпечуючи високу ефективність і гнучкість у управлінні ресурсами [2].

Метою цієї статті є аналіз концепції роїв БПЛА в контексті мобільних логістичних і моніторингових систем, визначення ключових напрямів їхнього застосування, а також вивчення методів забезпечення надійності цих систем. У статті розглядаються конкретні задачі, які включають: оцінку ефективності використання роїв БПЛА для вирішення логістичних та моніторингових завдань, аналіз особливостей, проблем і переваг при використанні роїв БПЛА у різних сферах, загальні проблеми та обмеження, з якими стикаються мобільні системи на базі роїв БПЛА. Аналіз цих джерел проведено відповідно до класифікації, описаної в розділі 2, з підсумковим оглядом підходів, представлених у розділі 3. Далі наведено висновки і подальші напрямки роботи.

1. Огляд видів роїв БПЛА

Рої безпілотних літальних апаратів являють собою один із найбільш передових напрямків у сучасній логістиці та автоматизації. Вони мають потенціал значно змінити способи доставки, управління ресурсами

та виконання багатьох інших завдань. Цей огляд фокусується на різних типах роїв БПЛА, їх функціональних можливостях та застосуваннях. Рої БПЛА можуть класифікуватися за різними ознаками, такими як типи апаратів, що входять до складу рою, рівень автономності, способи управління, а також за специфічними завданнями, які вони виконують (рис. 1).



Рис. 1. Класифікація роїв БПЛА

За типами апаратів:

- **Однорідні рої:** Всі апарати у рої є ідентичними за своїми характеристиками і функціями. Це дозволяє стандартизувати процеси управління та координації, але обмежує гнучкість у виконанні різноманітних завдань.

- **Різнорідні рої:** Включають апарати різних типів та характеристик. Це дає змогу виконувати ширший спектр завдань, проте ускладнює управління і координацію.

За рівнем автономності:

- **Повністю автономні рої:** Мають здатність самостійно приймати рішення на основі заданих алгоритмів і сенсорної інформації. Використовуються для складних і небезпечних завдань, де людське втручання є мінімальним або неможливим.

- **Напівавтономні рої:** Виконують завдання під наглядом і з можливістю втручання оператора. Це поєднує переваги автоматизації та гнучкість ручного управління.

За способами керування:

- **Централізовані рої:** Управління здійснюється з одного центрального вузла, який координує всі дії апаратів у рої. Це спрощує контроль, але створює ризик виходу з ладу всього рою у випадку проблем із центральним вузлом.

- **Децентралізовані рої:** Кожен апарат має певну ступінь автономності і здатний взаємодіяти з іншими апаратами для координації дій. Це підвищує стійкість до відмов окремих компонентів і забезпечує більшу гнучкість.

Класифікація мобільних логістичних систем із застосуванням технології роїв БПЛА наведена на рис. 2. Рої БПЛА можуть виконувати різноманітні завдання, що залежать від їхньої конфігурації та програмного забезпечення. Серед основних функціональних можливостей виділяють:

- **Моніторинг і спостереження:** Рої БПЛА можуть використовуватися для збирання даних у реальному часі, що є особливо корисним у сільському господарстві, лісовому господарстві, охороні навколишнього середовища та міському плануванні [24].

- **Логістика і доставка:** Здатні швидко і ефективно доставляти вантажі, медикаменти та інші критично важливі ресурси у віддалені або важкодоступні райони [41].

- **Пошуково-рятувальні операції:** Рої можуть швидко обстежувати великі площі, виявляти постраждалих і передавати інформацію рятувальним службам [9].

- **Інфраструктурні інспекції:** Використовуються для перевірки стану мостів, ліній електропередач, нафто- і газопроводів, що дозволяє виявляти проблеми на ранніх стадіях і проводити необхідні ремонтні роботи.

Також рої БПЛА можуть бути застосовані в різних галузях:

- **Сільське господарство:** Використовуються для моніторингу стану посівів, внесення добрив та пестицидів, а також для оцінки врожайності [28].

- **Будівництво та інфраструктура:** Забезпечують інспекції будівельних майданчиків, моніторинг прогресу будівництва та перевірку безпеки споруд.

- **Військова справа:** Використовуються для розвідки, спостереження, а також для тактичних операцій, що потребують координації великої кількості апаратів.

- **Екологічний моніторинг:** Допомогають у виявленні і моніторингу екологічних проблем, таких як забруднення води і повітря, зсуви ґрунту та інші природні явища.

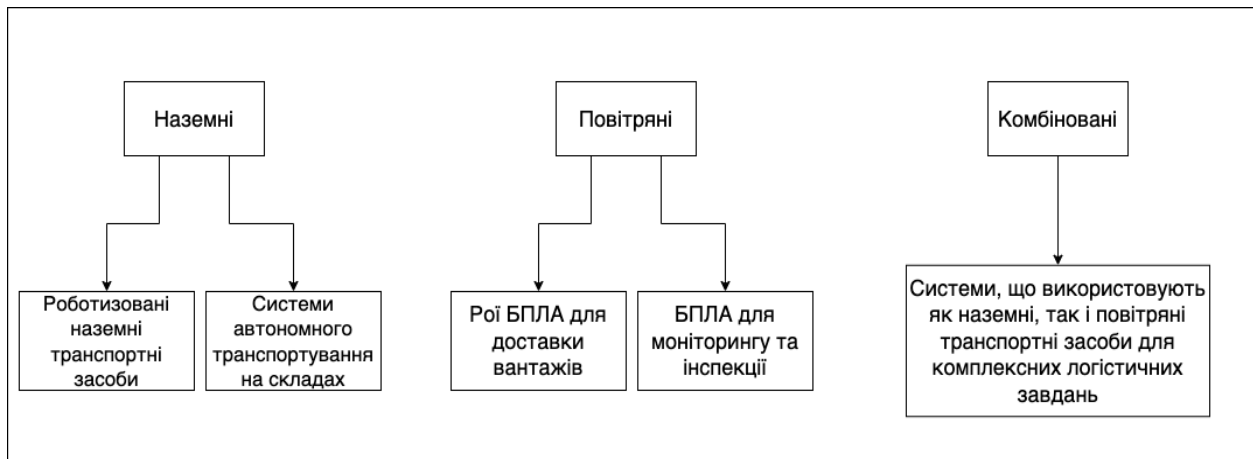


Рис. 2. Класифікація мобільних логістичних систем із застосуванням технології роїв БПЛА

2. Класифікація джерел

Концепція роїв БПЛА може бути застосована в багатьох сферах діяльності, але в цій статті розглядаються найбільш поширені галузі, які можна вважати основними або такими, що суттєво вплинули на розвиток цієї технології. Таким чином, було переглянуто низку оглядових робіт щодо роїв БПЛА, щоб зрозуміти найбільш обговорювані галузі з точки зору (табл. 1).

Логістика, розумні міста та галузі охорони здоров'я можна знайти майже в кожній оглядовій статті чи роботі про рої БПЛА. Табл. 1 це підтверджує. Ці галузі були обрані основними для огляду в поточній статті. Ще три галузі будуть розглянуті через цікаві роботи та для поширення контексту при аналізі індустрії роїв БПЛА, а саме освіта, будівництво та залізничний транспорт. Було розглянуто додаткові роботи із конкретними прикладами впровадження роїв БПЛА у кожній із індустрій.

Повний перелік галузей, які будуть розглянуті, і пов'язані роботи можна знайти в табл. 2.

Таблиця 1 – Галузі та оглядові роботи, в яких ці галузі аналізувалися

№	Галузь	Оглядові роботи
1	Логістика	[1], [2], [3], [4], [5], [6], [37], [38], [39], [40], [41], [42]
2	Безпека	[9], [10], [11], [14], [30]
3	Моніторинг	[9], [24], [32], [34], [44], [45], [46]
4	Комунікації	[7], [8], [9], [10], [27]
5	Розумні міста	[12], [13], [14], [15], [16], [29]
6	Системи забезпечення надійності	[17], [18], [19], [23], [35]
7	Машинне навчання	[20], [21], [22], [25], [26], [28], [31], [33], [36]

Таблиця 2 – Перелік індустрій для огляду та аналізу

#	Галузь	Роботи за напрямками
1	Логістика	1. Оглядові статті, що включають галузь [1-4, 37-42] 2. Implementation and Critical Factors of UAV in Warehouse Management: A Syst. Literature Review - [5] 3. A Real-Time Path Planning Method for Urban Low-Altitude Logistics UAVs - [6]
2	Безпека	1. Оглядові статті, що включають галузь [9-11, 14, 30] 2. A New Shift in Implementing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the Safety and Security of Smart Cities: A Systematic Literature Review. - [12]
3	Моніторинг	1. Оглядові статті, що включають галузь [9, 24, 32, 34, 44, 45, 46] 2. Routing Protocols for UAV-Aided Wireless Sensor Networks - [7]
4	Комунікації	1. Оглядові статті, що включають галузь [8-10, 27] 2. Routing Protocols for UAV-Aided Wireless Sensor Networks - [7] 3. A New Shift in Implementing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the Safety and Security of Smart Cities: A Systematic Literature Review - [12]
5	Розумні міста	1. Оглядові статті, що включають галузь [12-16, 29] 2. Meta-analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery for Agro-environmental Monitoring Using Machine Learning and Statistical Models - [28] 3. 3D Trajectory Planning Method for UAVs Swarm in Building Emergencies - [34]
6	Системи забезпечення надійності	1. Оглядові статті, що включають галузь [17-19, 23, 35] 2. Towards Fully Autonomous UAVs: A Survey - [20]; 3. Artificial Intelligence-Based Autonomous UAV Networks: A Survey - [21] 4. Autonomous Control of Unmanned Aerial Vehicles - [22]
7	Аналіз та обробка даних	1. Оглядові статті, що включають галузь [20-22, 25, 26, 28, 31, 33, 36] 2. Impact of Texture Information on Crop Classification with Machine Learning and UAV Images - [31] 3. A UAV-Swarm-Communication Model Using a Machine-Learning Approach for Search-and-Rescue Applications - [32]

3. Аналіз джерел та підходів за різними індустріями у використанні роїв БПЛА

Для визначення переваг і проблем у застосуванні роїв БПЛА, а також формулювання загальних викликів і особливостей, було прийнято рішення проаналізувати ключові індустрії, де використовуються рої БПЛА. Це дозволить більш широко поглянути на можливості технології. У цьому розділі будуть детально розглянуті та проаналізовані обрані галузі застосування роїв БПЛА. Кожен із параграфів по галузі містить загальний опис, особливості, проблеми та приклади використання.

3.1. Логістика. Сьогодні логістика є однією з найперспективніших сфер для впровадження та

інтеграції роїв БПЛА. Цей сектор включає різні формати використання роїв на кожному етапі ланцюга постачань – від складування та транспортування до доставки та обслуговування. Рої БПЛА можуть допомогти з оптимізацією маршрутів доставки, моніторингом стану вантажів, оцінюванням ефективності логістичних процесів, а також покращенням обслуговування клієнтів через швидку і точну доставку. Очікується, що рої БПЛА стануть головним інструментом у логістичній системі майбутнього, оскільки їх можна застосовувати на кожному етапі логістичного циклу.

Одним із викликів у логістичних системах є автоматизація та забезпечення надійної доставки в економічно ефективний спосіб. Рої БПЛА можуть допо-

могли в оцінці та аналізі ефективності логістичних операцій, а також кожного з факторів, що впливають на якість та швидкість доставки.

В одній із робіт [5] було запропоновано модель із трьома типами застосувань роїв БПЛА у логістичних процесах, які фокусуються на різних аспектах логістики:

- Рої для моніторингу вантажів – стеження за станом та безпекою вантажів під час транспортування.
- Рої для оптимізації маршрутів – планування найкращих маршрутів для швидкої та ефективної доставки.
- Рої для автоматизації складування – автоматичне переміщення товарів на складі.

Також було запропоновано додати четвертий пункт до розглянутої класифікації – утилізація та переробка відходів логістичних операцій.

Інше дослідження [43] показує, що рої БПЛА можуть бути корисними під час навчання логістичного персоналу або для допомоги низько кваліфікованим працівникам. Операторам потрібні глибокі знання системи, щоб швидко приймати важливі рішення під час логістичних операцій. У одній зі статей пропонується використовувати мобільну систему віддаленого моніторингу з використанням доповненої реальності, щоб допомогти операторам із низькою кваліфікацією полегшити робочий процес.

Логістика також має власний перелік проблем:

- Робота роїв БПЛА у режимі реального часу – логістика вимагає швидкої реакції. Водночас, рої потребують потужності для обробки великих обсягів даних.
- Величезні обсяги даних – велика кількість взаємозв'язків ускладнює систему та генерує великий потік даних.
- Рої БПЛА у логістиці відкривають двері для майбутніх систем автоматизованої доставки, забезпечуючи швидкість, точність та ефективність усіх логістичних процесів.

3.2. Безпека. Рої БПЛА стають все більш важливими у сфері безпеки завдяки своїй здатності швидко та ефективно виконувати різні завдання. Основні аспекти використання роїв БПЛА в цій галузі:

Рої БПЛА можуть бути ефективно використані для моніторингу великих територій у реальному часі. Вони можуть забезпечити безперервне спостереження за критичними інфраструктурними об'єктами, такими як електростанції, трубопроводи або нафтобази. Завдяки своїй мобільності та можливості працювати в координації, рої БПЛА можуть швидко реагувати на будь-які загрози або підозрілі дії, забезпечуючи операторів необхідною інформацією для прийняття рішень.

Рої БПЛА можуть значно покращити ефективність пошуково-рятувальних операцій [9]. Вони можуть швидко покривати великі площі, виявляти постраждалих і передавати їхні координати рятувальним командам. Оснащені камерами з високою роздільною здатністю та інфрачервоними сенсорами, дрони можуть працювати як вдень, так і вночі, у важкодоступних або небезпечних для людей місцях.

Рої БПЛА також можуть бути використані для контролю масових заходів, забезпечуючи безпеку під час концертів, спортивних подій або протестів. Вони можуть відстежувати натовп, виявляти потенційні загрози та швидко передавати інформацію правоохоронним органам. Завдяки своїй мобільності, рої можуть оперативнo реагувати на зміни ситуації та надавати підтримку в реальному часі.

У сфері антитерористичних операцій рої БПЛА можуть виконувати розвідувальні місії, забезпечувати ситуаційну обізнаність та навіть брати участь у нейтралізації загроз. Вони можуть проникати у важкодоступні місця, забезпечуючи операторів інформацією, що дозволяє краще планувати операції та мінімізувати ризики для особового складу.

Однак існують і виклики, пов'язані з їх використанням, такі як забезпечення надійного зв'язку між дронами, захист від кібератак та інтеграція з існуючими системами безпеки.

Рої БПЛА мають величезний потенціал у сфері безпеки завдяки своїм унікальним можливостям. Незважаючи на існуючі виклики, розвиток технологій та інтеграція роїв БПЛА з існуючими системами безпеки можуть значно покращити загальний рівень безпеки.

3.3. Моніторинг. Рої БПЛА також є важливим інструментом для різноманітних завдань з моніторингу завдяки своїй гнучкості, автономності та здатності працювати у координації. Нижче наведені основні способи використання роїв БПЛА у цій сфері:

Рої БПЛА можуть бути оснащені датчиками для моніторингу хімічних, біологічних, радіологічних та ядерних речовин. Це особливо важливо у ситуаціях, пов'язаних з аваріями на промислових об'єктах. БПЛА можуть швидко обстежити великі площі, виявити наявність небезпечних речовин та передати дані в реальному часі до відповідних служб [9].

Рої БПЛА використовуються для пошуку зниклих осіб у важкодоступних місцевостях або після стихійних лих. Оснащені тепловізорами та камерами з високою роздільною здатністю, дрони можуть швидко виявляти постраждалих [32], навіть у складних умовах, таких як лісові пожежі або землетруси. Ці дані дозволяють рятувальним службам оперативнo реагувати та надавати допомогу.

БПЛА можуть бути обладнані сенсорами для моніторингу якості повітря та води, моніторингу витоків нафти та інших забруднюючих речовин. Вони здатні обстежувати великі водні та земельні території, виявляти джерела забруднення та контролювати екологічну ситуацію. Це особливо корисно для швидкого реагування на аварії та запобігання їх подальшому розповсюдженню. Рої БПЛА можуть бути використані для моніторингу та моніторингу лісових пожеж. Вони можуть оперативнo оцінювати масштаби пожежі, виявляти нові осередки займання та надавати точну інформацію рятувальним командам. Це дозволяє швидше реагувати на пожежі та зменшувати шкоду для природи та населення.

Однак, існують і виклики, такі як забезпечення надійного зв'язку між дронами, інтеграція з існуючими системами та забезпечення кібербезпеки.

У реальних умовах рої БПЛА вже використовуються для моніторингу великих інфраструктурних проєктів, таких як нафтові платформи та газопроводи. Вони можуть виявляти витоки, оцінювати стан конструкцій та забезпечувати безпеку працівників.

Вони здатні забезпечити ефективний моніторинг, швидке реагування та високий рівень безпеки у різних галузях. Незважаючи на існуючі виклики, розвиток технологій та інтеграція роїв БПЛА з існуючими системами можуть значно покращити загальний рівень безпеки та ефективності моніторингу.

3.4. Комунікації. Рої БПЛА відкривають нові горизонти у сфері комунікацій завдяки своїй здатності забезпечувати швидке розгортання, гнучкість та автономність. Нижче наведені основні способи використання роїв БПЛА у цій галузі:

Рої БПЛА можуть бути розгорнуті для створення тимчасових комунікаційних мереж під час надзвичайних ситуацій, таких як стихійні лиха або техногенні катастрофи. Вони можуть забезпечувати зв'язок між рятувальними командами та постраждалими, допомагаючи координувати операції з рятування та надання допомоги [9].

У віддалених або важкодоступних районах рої БПЛА можуть бути використані для розгортання тимчасових мереж зв'язку [7]. Вони можуть забезпечувати інтернет-доступ, телефонний зв'язок та передачу даних для спільнот, які не мають постійної комунікаційної інфраструктури.

У містах рої БПЛА можуть бути використані для розширення існуючих комунікаційних мереж під час великих заходів, таких як спортивні події або концерти. Вони можуть забезпечувати додаткову пропускну здатність мережі, покращуючи якість зв'язку та швидкість передачі даних для учасників заходу.

У військовій сфері рої БПЛА можуть бути використані для забезпечення зв'язку між підрозділами в умовах бойових дій. Вони можуть створювати мобільні та захищені мережі, забезпечуючи надійний зв'язок навіть у найскладніших умовах. Це дозволяє командуванню ефективніше координувати дії військ та оперативно реагувати на змінні обставини.

У контексті розумних міст рої БПЛА можуть бути використані для забезпечення зв'язку між різними елементами міської інфраструктури. Вони можуть допомагати в управлінні дорожнім рухом, моніторингу стану навколишнього середовища, а також забезпечувати зв'язок між датчиками та системами управління [12].

Основними перевагами роїв БПЛА у сфері комунікацій є їхня мобільність, швидкість розгортання та гнучкість. Вони можуть забезпечувати зв'язок у найскладніших умовах, де традиційні методи комунікації недоступні або недостатньо ефективні. Однак, існують і виклики, такі як забезпечення безпеки передачі даних, стійкість до перешкод та тривалість роботи БПЛА.

Рої БПЛА мають великий потенціал у сфері комунікацій завдяки своїм унікальним можливостям. Вони здатні забезпечити надійний зв'язок у різних умовах, швидко реагувати на надзвичайні ситуації та

покращувати інфраструктуру зв'язку у міських та віддалених районах. Незважаючи на існуючі виклики, розвиток технологій та інтеграція роїв БПЛА з існуючими комунікаційними системами можуть значно підвищити загальний рівень комунікаційної інфраструктури.

3.5. Розумні міста. Розумні міста використовують сучасні технології для підвищення якості життя своїх мешканців, покращення інфраструктури та забезпечення стійкого розвитку. Рої БПЛА є важливим компонентом у цій екосистемі, оскільки вони можуть виконувати різноманітні завдання з високою ефективністю та гнучкістю.

Рої БПЛА можуть використовуватися для регулярного моніторингу стану міської інфраструктури, включаючи мости, дороги, будівлі та інші об'єкти. Вони можуть здійснювати інспекції, виявляти пошкодження та запобігати аваріям, забезпечуючи тим самим безпеку та довговічність міських споруд.

У розумних містах рої БПЛА можуть допомагати у моніторингу та управлінні дорожнім рухом. Вони можуть збирати дані про трафік у режимі реального часу, виявляти затори та аварії, а також надавати рекомендації щодо оптимальних маршрутів для водіїв. Це допомагає зменшити затори, підвищити безпеку на дорогах та покращити загальну мобільність у місті.

Рої БПЛА можуть використовуватися для моніторингу [16] якості повітря, води та стану навколишнього середовища. Вони можуть збирати дані про рівень забруднення, викиди парникових газів та інші екологічні показники. Це дозволяє вчасно реагувати на екологічні проблеми та здійснювати заходи для їх вирішення, забезпечуючи таким чином здорове середовище для мешканців міста.

Рої БПЛА можуть забезпечувати патрулювання та моніторинг міських районів для підвищення рівня безпеки [12]. Вони можуть виявляти підозрілу активність, запобігати злочинам та оперативно реагувати на надзвичайні ситуації. Це дозволяє підвищити рівень громадської безпеки та створити комфортні умови для життя.

Управління відходами є важливою складовою розумних міст. Рої БПЛА можуть використовуватися для моніторингу та оптимізації процесу збору та утилізації відходів. Вони можуть здійснювати інспекції сміттєвих контейнерів, планувати маршрути для сміттєвозів та забезпечувати ефективну роботу системи управління відходами.

Під час надзвичайних ситуацій рої БПЛА можуть бути розгорнуті для швидкого реагування та надання допомоги [13]. Вони можуть здійснювати пошук і рятування постраждалих, доставляти медичні засоби та координувати рятувальні операції. Це дозволяє значно зменшити час реагування та підвищити ефективність рятувальних заходів.

Рої БПЛА мають великий потенціал у розвитку розумних міст. Вони можуть виконувати різноманітні завдання, забезпечуючи моніторинг, управління та реагування у різних сферах міського життя. Завдяки своїм унікальним можливостям, рої БПЛА можуть значно підвищити якість життя мешканців,

покращити інфраструктуру та забезпечити стійкий розвиток міських територій..

3.6. Системи забезпечення надійності. Системи забезпечення надійності є ключовим аспектом при використанні роїв БПЛА у різних сферах. Рої БПЛА можуть значно підвищити системи забезпечення надійності у інфраструктурі, комунікаціях та операціях завдяки своїй гнучкості, швидкості реагування та можливості працювати у важкодоступних місцях.

Рої БПЛА можуть проводити регулярний моніторинг критичної інфраструктури, такої як мости, дамби, електростанції та нафтопроводи. Вони здатні швидко виявляти пошкодження або ознаки зносу, що дозволяє своєчасно проводити необхідні ремонтні роботи та запобігати аваріям. Завдяки цьому підвищується загальна надійність інфраструктурних об'єктів [17].

У сфері енергетики, наприклад, рої БПЛА можуть використовуватися для інспекції ліній електропередач та вітрових турбін. Вони можуть здійснювати детальну перевірку стану обладнання, виявляти дефекти та планувати обслуговування без необхідності зупинки роботи систем. Це забезпечує безперервність роботи та зменшує ризики відмов обладнання.

Під час природних катастроф або техногенних аварій рої БПЛА можуть швидко реагувати та надавати оперативну інформацію про стан інфраструктури та допомагати у проведенні рятувальних операцій. Вони можуть створювати карти зруйнованих територій, знаходити постраждалих та доставляти необхідні ресурси, що підвищує ефективність реагування та зменшує втрати.

Рої БПЛА можуть використовуватися для забезпечення надійності комунікацій у важкодоступних або віддалених районах. Вони можуть створювати тимчасові мережі зв'язку у разі виходу з ладу стаціонарної інфраструктури або забезпечувати зв'язок під час великих заходів, коли існуючі мережі перевантажені. Це дозволяє забезпечити безперервний зв'язок у критичних ситуаціях [19].

Рої БПЛА є потужним інструментом для забезпечення надійності у різних сферах. Вони можуть проводити детальний моніторинг, інспекції та обслуговування інфраструктури, реагувати на надзвичайні ситуації та забезпечувати надійність комунікацій. Завдяки своїм унікальним можливостям рої БПЛА сприяють підвищенню надійності та безпеки у сучасних системах та інфраструктурах.

3.7. Аналіз та обробка даних. Машинне навчання є однією з найбільш перспективних технологій, яка може значно покращити функціональність та ефективність роїв БПЛА. Використання ШІ в роях БПЛА відкриває нові можливості для автоматизації, обробки даних, прийняття рішень та виконання складних завдань. ШІ дозволяє роям БПЛА працювати автономно без постійного втручання людини. Завдяки алгоритмам машинного навчання та нейронним мережам, БПЛА можуть самостійно організовувати свою роботу, координувати дії з іншими дронами в рої та адаптуватися до змінних умов середовища. Це особливо корисно для виконання завдань у важкодоступних або небезпечних місцях.

Рої БПЛА, оснащені ШІ, можуть збирати та обробляти величезні обсяги даних у режимі реального часу. Вони можуть аналізувати зображення та відео [28], виявляти аномалії, розпізнавати об'єкти та робити висновки на основі зібраної інформації. Це дозволяє використовувати рої БПЛА для моніторингу стану інфраструктури, сільськогосподарських угідь, природних ресурсів та інших об'єктів. ШІ може оптимізувати маршрути польоту роїв БПЛА для виконання різних завдань, таких як доставка вантажів, патрулювання або пошуково-рятувальні операції. Алгоритми оптимізації можуть враховувати різні фактори, включаючи погодні умови, обмеження повітряного простору, енергетичні ресурси дронів та пріоритетність завдань, забезпечуючи таким чином ефективне використання ресурсів. ШІ дозволяє прогнозувати можливі поломки та відмови в роботі роїв БПЛА на основі аналізу даних про їхню експлуатацію. Це дозволяє вживати превентивні заходи для обслуговування та ремонту дронів, що знижує ризик неочікуваних поломок та підвищує загальну надійність системи.

У сфері безпеки рої БПЛА можуть використовувати ШІ для виявлення та знешкодження потенційних загроз. Наприклад, вони можуть ідентифікувати підозрілі об'єкти, відслідковувати рух підозрюваних осіб або транспортних засобів та навіть здійснювати автоматичне втручання у разі загрози. Це робить їх цінним інструментом для забезпечення громадської безпеки та боротьби зі злочинністю. ШІ дозволяє роям БПЛА навчатися на основі попереднього досвіду та адаптувати свої дії до нових умов. Це забезпечує постійне покращення їхньої ефективності та можливість виконання все більш складних завдань. Завдяки методам глибокого навчання, рої БПЛА можуть постійно вдосконалювати свої навички та здатність реагувати на нові виклики. В одній з робіт [36] було розглянуто використання ШІ для роїв БПЛА в сільському господарстві. Завдяки машинному навчанню дрони можуть аналізувати стан посівів, виявляти шкідників та хвороби рослин, прогнозувати врожайність та оптимізувати використання добрив. Інший приклад – застосування ШІ для координації роїв БПЛА під час рятувальних операцій після природних катастроф, де дрони можуть самостійно розподіляти зони пошуку та забезпечувати ефективну комунікацію між собою та рятувальниками.

Інтеграція ШІ в рої БПЛА значно розширює їхні можливості та підвищує ефективність виконання завдань. Завдяки автономності, інтелектуальному плануванню, прогнозуванню та адаптації, рої БПЛА можуть успішно виконувати різноманітні завдання у різних сферах, забезпечуючи високу надійність та продуктивність.

4. Висновки за оглядом напрямків

Рої БПЛА є відносно новою та інноваційною концепцією, що швидко розвивається. Вони вже демонструють значний потенціал у ряді галузей, включаючи оборону, безпеку, сільське господарство та логістику. Аналіз впровадження роїв БПЛА в цих сферах показує, що їх використання приносить численні

переваги, зокрема в підвищенні ефективності, зниженні витрат і розширенні можливостей для виконання складних завдань.

Відповідно до проведеного огляду, можна відзначити, що ключовими областями, де рої БПЛА знаходять найширше застосування, є: оборонний сектор, де вони використовуються для виконання розвідувальних і бойових завдань; сільське господарство, де рої допомагають у моніторингу культур і управлінні

ресурсами; та логістика, де вони оптимізують доставку товарів та управління складськими запасами. Однак рої БПЛА також активно використовуються в таких сферах, як надзвичайні ситуації та рятувальні операції, де їх здатність швидко реагувати і збирати інформацію є критично важливою.

У табл. 3 підсумовано основні характеристики та проблеми для кожної розглянутої галузі.

Таблиця 3 – Особливості та проблеми розглянутих галузей використання роїв БПЛА у мобільних логістичних системах

№	Галузь	Особливості	Виклики
1	Логістика	Рої БПЛА здатні автоматизувати складські операції, моніторити вантажі та оптимізувати маршрути доставки. Вони забезпечують ефективну координацію дій, що дозволяє скоротити час на виконання логістичних завдань і зменшити витрати.	Основними проблемами є необхідність інтеграції з існуючими логістичними системами, забезпечення безпеки даних і зменшення ризику зіткнень між дронами та іншими об'єктами.
2	Безпека	Рої БПЛА використовуються для патрулювання територій, моніторингу громадських заходів і швидкого реагування на надзвичайні ситуації. Вони здатні забезпечувати цілодобове спостереження та збір даних у реальному часі.	Основними викликами є захист від кіберзагроз, підтримання постійної комунікації між дронами та операторами.
3	Моніторинг	Рої БПЛА можуть використовуватися для моніторингу аномалій, моніторингу змін у навколишньому середовищі та розпізнавання об'єктів. Вони можуть проводити розвідку у важкодоступних або небезпечних місцях.	Основні проблеми включають забезпечення точності моніторингу, обробку великої кількості даних і розробку алгоритмів для автоматичного розпізнавання об'єктів.
4	Комунікації	Рої БПЛА можуть створювати тимчасові мережі для забезпечення зв'язку в зонах надзвичайних ситуацій або в районах з обмеженим доступом до інфраструктури. Вони можуть забезпечувати передачу даних і голосового зв'язку між різними точками.	Основними викликами є забезпечення стабільної передачі даних, подолання перешкод і зниження затримок у зв'язку.
5	Розумні міста	Рої БПЛА можуть допомагати у моніторингу та управлінні інфраструктурою розумних міст, включаючи транспортні системи, енергопостачання та системи безпеки. Вони здатні збирати дані про стан доріг, якість повітря та інші параметри міського середовища.	Основні проблеми включають інтеграцію з існуючими міськими системами, забезпечення приватності даних і створення нормативної бази для використання дронів у міських умовах.
6	Системи забезпечення надійності	Рої БПЛА можуть використовуватися для регулярного моніторингу стану інфраструктури, включаючи мости, дороги, електромережі та нафто- і газопроводи. Вони здатні виявляти пошкодження та прогнозувати необхідність обслуговування.	Основними викликами є забезпечення безперервної роботи рою в різних умовах, збирання точних даних і розробка алгоритмів для прогнозування відмов.
7	Аналіз та обробка даних	Інтеграція ШІ з роями БПЛА дозволяє автоматизувати складні завдання, включаючи обробку даних, прийняття рішень і адаптацію до змінних умов. ШІ допомагає дронам самостійно організувати свою роботу та оптимізувати виконання завдань.	Основні проблеми включають розробку ефективних алгоритмів ШІ, забезпечення безпеки та надійності систем, а також інтеграцію ШІ з іншими технологіями та системами.

Багато проблем, з якими стикаються рої БПЛА, є спільними для різних галузей, наприклад, проблеми з інтеграцією в існуючі системи, управління даними та забезпечення безпеки польотів. Важливо зазначити,

що, хоча рої БПЛА можуть бути адаптовані до різних завдань і середовищ, їх ефективність і переваги можуть бути максимізовані тільки за умови врахування

специфічних вимог кожної галузі та подолання існуючих викликів. Іншим аспектом, який виділяється в кожній галузі техніки, є застосування роїв БПЛА на різних рівнях протягом життєвого циклу логістичних систем. Як під час оптимізації маршрутів, так і під час автоматизації складування, початкові моделі можуть бути протестовані, а припущення підтверджені у віртуальному середовищі перед початком повномасштабного впровадження. І в системах безпеки, і в системах комунікацій рої БПЛА вимагають постійного моніторингу та обслуговування, яке можна оптимізувати за допомогою методів прогнозного технічного обслуговування.

Переваги. До основних переваг можна віднести:

- швидке впровадження та адаптація до змінних умов;
- прогнозування проблем і планування операцій – прогнозне обслуговування;
- безпека та зменшення ризиків – допомога в передбаченні аварій або простоїв системи;
- підвищення продуктивності та зниження витрат;
- доступність – рої БПЛА можуть контролюватися та використовуватися віддалено або в автоматизованому режимі;
- зменшення витрат – допомагають уникнути надмірного використання ресурсів та покращити ефективність операцій;
- навчання – спрощують процес навчання персоналу та полегшують виконання складних завдань.

Виклики. Основні проблеми при створенні роїв БПЛА пов'язані з високою складністю, точністю моделювання та забезпеченням безпеки систем. Це пов'язано з тим, що роївими системи БПЛА об'єднують широкий спектр передових технологій і, в деяких випадках, включають використання різних типів дронів. Сучасні проблеми можна підсумувати таким чином:

- енергоефективність – рої БПЛА зазвичай живляться від батареї, і управління енергією стає критичним, особливо для великих роїв, які можуть мати тривалі місії. Пошук способів продовжити час роботи на одному заряді залишається актуальним завданням;
- перешкоди між дронами – у роях, що складаються з великої кількості дронів, існує проблема інтерференції сигналу, яка може вплинути на координату та зв'язок між ними. Це стає особливо проблематичним у складних умовах або з великою кількістю дронів;
- кібербезпека – оскільки дрони працюють через бездротові мережі, вони можуть стати об'єктами хакерських атак. Захист каналів зв'язку та даних від кіберзагроз є важливою проблемою;
- забезпечення безпеки та надійності – у роях БПЛА важливо забезпечити надійність їх роботи навіть в умовах втрати зв'язку з центральним контроле-

ром або іншими дронами. Необхідні методи для самостійного прийняття рішень та адаптації до несподіваних ситуацій;

- правове регулювання – у багатьох країнах досі немає чітких правил і законів, що регулюють використання роїв БПЛА, особливо в громадських місцях. Це обмежує можливості їх застосування і може гальмувати розвиток техніки;

- етичні питання – використання роїв БПЛА, особливо у військових операціях, ставить багато етичних питань, включаючи відповідальність за дії автономних систем та їхній вплив на цивільне населення. Сучасні дослідження роїв БПЛА намагаються вирішити ці проблеми, одночасно розширюючи область їх застосування. Незважаючи на ці проблеми, рої БПЛА вважаються однією з провідних технологій у логістиці, військових та інших секторах. Зростаючий науковий інтерес до роїв БПЛА свідчить про їхнє велике значення не тільки для наукових досліджень, а й для практичного використання в різних сферах, таких як логістика, міське управління, та інші галузі, де важлива висока ефективність та оперативність процесів.

5. Подальші напрямки роботи

У рамках подальших досліджень планується розвивати тему «Моделі, методи та засоби розроблення і розгортання мобільних логістичних систем на базі роїв БПЛА».

Як зазначалося раніше, логістика є однією з ключових областей для використання роїв БПЛА, яка потребує високих стандартів ефективності та безпеки. Відповідно, основні задачі досліджень включають:

- розроблення концепції та системної моделі мобільних логістичних систем — створення фундаментальної моделі, яка враховуватиме специфіку роїв БПЛА та їх інтеграцію в логістичні процеси;
 - розроблення та дослідження математичних моделей МЛС як систем масового обслуговування — розробка математичних моделей для оптимізації логістичних операцій за умов різноманітності роїв БПЛА та вимог до часу доставки;
 - розроблення та дослідження методів забезпечення гарантоздатності МЛС — визначення методів для підвищення надійності системи з урахуванням логістичних показників, таких як швидкість, точність та безпека доставки;
 - розроблення методів і систем підтримки прийняття рішень — створення алгоритмів для формування оптимальних роїв БПЛА відповідно до конкретних логістичних завдань та умов кіберфізичного середовища.
- Таким чином, ця робота спрямована на покращення цілісності та безпеки мобільних логістичних систем на базі роїв БПЛА, підвищення їх продуктивності та адаптивності до складних умов експлуатації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Joonyup Eun, Byung Duk Song, Songbook Lee and Dae-Eun Lim, Mathematical Investigation on the Sustainability of UAV Logistics. Sustainability 2019, 11(21), 5932; <https://doi.org/10.3390/su11215932>
2. Yi Li, Min Liu and Dandan Jiang, Application of Unmanned Aerial Vehicles in Logistics: A Literature Review. Sustainability 2022, 14(21), 14473; <https://doi.org/10.3390/su142114473>

3. Hanxue Li, Shuaiqi Zhu, Amr Tolba, Ziyi Liu and Wu Wen, A Reliable Delivery Logistics System Based on the Collaboration of UAVs and Vehicles. *Sustainability* 2023, 15(17), 12720; <https://doi.org/10.3390/su151712720>
4. Shan Li, Honghai Zhang, Zhuolun Li and Hao Liu, An Air Route Network Planning Model of Logistics UAV Terminal Distribution in Urban Low Altitude Airspace. *Sustainability* 2021, 13(23), 13079; <https://doi.org/10.3390/su132313079>
5. Chommaphat Malang, Phasit Charoenkwan, and Ratapol Wudhikarn, Implementation and Critical Factors of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in Warehouse Management: A Systematic Literature Review. *Drones* 2023, 7(2), 80; <https://doi.org/10.3390/drones7020080>
6. Minyi Deng, Qingqing Yang and Yi Peng, A Real-Time Path Planning Method for Urban Low-Altitude Logistics UAVs. *Sensors* 2023, 23(17), 7472; <https://doi.org/10.3390/s23177472>
7. Muhammad Yeasir Arafat, Md Arafat Habib and Sangman Moh, Routing Protocols for UAV-Aided Wireless Sensor Networks. *Appl. Sci.* 2020, 10(12), 4077; <https://doi.org/10.3390/app10124077>
8. Saif Ullah, Khalid Hussain Mohammadani, Muhammad Asghar Khan, Zhi Ren, Reem Alkanhel, Ammar Muthanna and Usman Tariq, Position-Monitoring-Based Hybrid Routing Protocol for 3D UAV-Based Networks. *Drones* 2022, 6(11), 327; <https://doi.org/10.3390/drones6110327>
9. Ghulam E. Mustafa Abro, Saiful Azrin B. M. Zulkifli, Rana Javed Masood, Vijanth Sagayan Asirvadam and Anis Laouiti, Comprehensive Review of UAV Detection, Security, and Communication Advancements to Prevent Threats. *Drones* 2022, 6(10), 284; <https://doi.org/10.3390/drones6100284>
10. Asmaa Abdallah, M. Zulfiker Ali, Jelena Mišić and Vojislav B. Mišić, Efficient Security Scheme for Disaster Surveillance UAV Communication Networks. *Information* 2019, 10(2), 43; <https://doi.org/10.3390/info10020043>
11. Marlena Robakowska, Daniel Ślęzak, Przemysław Żuratyński, Anna Tyrańska-Fobke, Piotr Robakowski, Paweł Prędkiewicz and Katarzyna Zorena, Possibilities of Using UAVs in Pre-Hospital Security for Medical Emergencies. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19(17), 10754; <https://doi.org/10.3390/ijerph191710754>
12. Khalifa AL-Dosari and Noora Fetais, A New Shift in Implementing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the Safety and Security of Smart Cities: A Systematic Literature Review. *Safety* 2023, 9(3), 64; <https://doi.org/10.3390/safety9030064>
13. Wedad Alawad, Nadhir Ben Halima and Layla Aziz, An Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System for Disaster and Crisis Management in Smart Cities. *Electronics* 2023, 12(4), 1051; <https://doi.org/10.3390/electronics12041051>
14. Nadir Abbas, Zeshan Abbas, Xiaodong Liu, Saad Saleem Khan, Eric Deale Foster and Stephen Larkin, A Survey: Future Smart Cities Based on Advance Control of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Appl. Sci.* 2023, 13(17), 9881; <https://doi.org/10.3390/app13179881>
15. Vyacheslav Kharchenko, Ihor Kliushnikov, Andrzej Rucinski, Herman Fesenko and Oleg Illiashenko, UAV Fleet as a Dependable Service for Smart Cities: Model-Based Assessment and Application. *Smart Cities* 2022, 5(3), 1151-1178; <https://doi.org/10.3390/smartcities5030058>
16. Adiel Ismail, Bigomokero Antoine Bagula and Emmanuel Tuyishimire, Internet-Of-Things in Motion: A UAV Coalition Model for Remote Sensing in Smart Cities. *Sensors* 2018, 18(7), 2184; <https://doi.org/10.3390/s18072184>
17. Enrico Petritoli, Fabio Leccese, and Lorenzo Ciani, Reliability and Maintenance Analysis of Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors* 2018, 18(9), 3171; <https://doi.org/10.3390/s18093171>
18. Krzysztof Andrzej Gromada and Wojciech Marcin Stecz, Designing a Reliable UAV Architecture Operating in a Real Environment. *Appl. Sci.* 2022, 12(1), 294; <https://doi.org/10.3390/app12010294>
19. Ning Ning, Suiping Zhou, Weimin Bao and Xiaoping Li, A Study on the Maximum Reliability of Multi-UAV Cooperation Relay Systems. *Sensors* 2024, 24(9), 2886; <https://doi.org/10.3390/s24092886>
20. Taha Elmokadem and Andrey V. Savkin, Towards Fully Autonomous UAVs: A Survey. *Sensors* 2021, 21(18), 6223; <https://doi.org/10.3390/s21186223>
21. Nurul I. Sarkar, and Sonia Gul, Artificial Intelligence-Based Autonomous UAV Networks: A Survey. *Drones* 2023, 7(5), 322; <https://doi.org/10.3390/drones7050322>
22. Victor M. Becerra, Autonomous Control of Unmanned Aerial Vehicles. *Electronics* 2019, 8(4), 452; <https://doi.org/10.3390/electronics8040452>
23. Krzysztof Mateja, Wojciech Skarka, Magdalena Peciak, Roman Niestrój and Maik Gude, Energy Autonomy Simulation Model of Solar Powered UAV. *Energies* 2023, 16(1), 479; <https://doi.org/10.3390/en16010479>
24. Paula Fraga-Lamas, Lucía Ramos, Víctor Mondéjar-Guerra and Tiago M. Fernández-Caramés, A Review on IoT Deep Learning UAV Systems for Autonomous Obstacle Detection and Collision Avoidance. *Remote Sens.* 2019, 11(18), 2144; <https://doi.org/10.3390/rs11182144>
25. Yassine Yazid, Imad Ez-Zazi, Antonio Guerrero-González, Ahmed El Oualkadi and Mounir Arioua, UAV-Enabled Mobile Edge-Computing for IoT Based on AI: A Comprehensive Review. *Drones* 2021, 5(4), 148; <https://doi.org/10.3390/drones5040148>
26. Anis Koubaa, Adel Ammar, Mohamed Abdelkader, Yasser Alhabashi and Lahouari Ghouti, AERO: AI-Enabled Remote Sensing Observation with Onboard Edge Computing in UAV. *Remote Sens.* 2023, 15(7), 1873; <https://doi.org/10.3390/rs15071873>
27. Petros S. Bithas, Emmanouel T. Michailidis, Nikolaos Nomikos, Demosthenes Vouyioukas and Athanasios G. Kanatas, A Survey on Machine-Learning Techniques for UAV-Based Communications. *Sensors* 2019, 19(23), 5170; <https://doi.org/10.3390/s19235170>
28. Roghieh Eskandari, Masoud Mahdianpari, Fariba Mohammadimanesh, Bahram Salehi, Brian Brisco and Saeid Homayouni, Meta-analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery for Agro-environmental Monitoring Using Machine Learning and Statistical Models. *Remote Sens.* 2020, 12(21), 3511; <https://doi.org/10.3390/rs12213511>
29. Vittorio Mazza, Lorenzo Comba, Aleem Khaliq, Marcello Chiaberge and Paolo Gay, UAV and Machine Learning Based Refinement of a Satellite-Driven Vegetation Index for Precision Agriculture. *Sensors* 2020, 20(9), 2530; <https://doi.org/10.3390/s20092530>
30. Chamali Sandamini, Madduma Wellalage Pasan Maduranga, Valmik Tilwari, Jamaiah Yahaya, Faizan Qamar, Quang Ngoc Nguyen and Siti Rohana Ahmad Ibrahim, A Review of Indoor Positioning Systems for UAV Localization with Machine Learning Algorithms. *Electronics* 2023, 12(7), 1533; <https://doi.org/10.3390/electronics12071533>

31. Geun-Ho Kwak and No-Wook Park, Impact of Texture Information on Crop Classification with Machine Learning and UAV Images. *Appl. Sci.* 2019, 9(4), 643; <https://doi.org/10.3390/app9040643>
32. Hisham Khalil, Saeed Ur Rahman, Inam Ullah, Inayat Khan, Abdulaziz Jarallah Alghadhban, Mosleh Hmoud Al-Adhaileh, Gauhar Ali and Mohammed ElAffendi, A UAV-Swarm-Communication Model Using a Machine-Learning Approach for Search-and-Rescue Applications. *Drones* 2022, 6(12), 372; <https://doi.org/10.3390/drones6120372>
33. Daniel H. Stolfi and Grégoire Danoy, An Evolutionary Algorithm to Optimise a Distributed UAV Swarm Formation System. *Appl. Sci.* 2022, 12(20), 10218; <https://doi.org/10.3390/app122010218>
34. Ángel Madridano, Abdulla Al-Kaff, David Martín and Arturo de la Escalera, 3D Trajectory Planning Method for UAVs Swarm in Building Emergencies. *Sensors* 2020, 20(3), 642; <https://doi.org/10.3390/s20030642>
35. Abhishek Phadke and F. Antonio Medrano, Towards Resilient UAV Swarms—A Breakdown of Resiliency Requirements in UAV Swarms. *Drones* 2022, 6(11), 340; <https://doi.org/10.3390/drones6110340>
36. Rui Ming, Rui Jiang, Haibo Luo, Taotao Lai, Ente Guo and Zhiyan Zhou, Comparative Analysis of Different UAV Swarm Control Methods on Unmanned Farms. *Agronomy* 2023, 13(10), 2499; <https://doi.org/10.3390/agronomy13102499>
37. Xudong Deng, Mingke Guan, Yunfeng Ma, Xijie Yang and Ting Xiang, Vehicle-Assisted UAV Delivery Scheme Considering Energy Consumption for Instant Delivery. *Sensors* 2022, 22(5), 2045; <https://doi.org/10.3390/s22052045>
38. Jianxun Li, Hao Liu, Kin Keung Lai and Bhagwat Ram, Vehicle and UAV Collaborative Delivery Path Optimization Model. *Mathematics* 2022, 10(20), 3744; <https://doi.org/10.3390/math10203744>
39. Young Kwan Ko, Ju Hyeong Park and Young Dae Ko, A Development of Optimal Algorithm for Integrated Operation of UGVs and UAVs for Goods Delivery at Tourist Destinations. *Appl. Sci.* 2022, 12(20), 10396; <https://doi.org/10.3390/app122010396>
40. Fang Li and Oliver Kunze, A Comparative Review of Air Drones (UAVs) and Delivery Bots (SUGVs) for Automated Last Mile Home Delivery. *Logistics* 2023, 7(2), 21; <https://doi.org/10.3390/logistics7020021>
41. Emanuel Jesús Ulin Hernández, Jania Astrid Saucedo Martínez and José Antonio Marmolejo Saucedo, Optimization of the Distribution Network Using an Emerging Technology. *Appl. Sci.* 2020, 10(3), 857; <https://doi.org/10.3390/app10030857>
42. Diyar Altinses, David Orlando Salazar Torres, Michael Schwung, Stefan Lier and Andreas Schwung, Optimizing Drone Logistics: A Scoring Algorithm for Enhanced Decision Making across Diverse Domains in Drone Airlines. *Drones* 2024, 8(7), 307; <https://doi.org/10.3390/drones8070307>
43. DroneARchery: Human-Drone Interaction through Augmented Reality with Haptic Feedback and Multi-UAV Collision Avoidance Driven by Deep Reinforcement Learning, available at: <https://ar5iv.labs.arxiv.org/html/2210.07730> (accessed August, 2024).
44. Ihor Kliushnikov, Vyacheslav Kharchenko, Herman Fesenko, Multi-UAV Routing for Critical Infrastructure Monitoring Considering Failures of UAVs: Reliability Models, Rerouting Algorithms, Industrial Case, available at: https://www.researchgate.net/profile/Elena-Zaitseva-2/publication/353590931_Multi-UAV_Routing_for_Critical_Infrastructure_Monitoring_Considering_Failures_of_UAVs_Reliability_Models_Rerouting_Algorithms_Industrial_Case/links/61124f10169a1a0103ee1d92/Multi-UAV-Routing-for-Critical-Infrastructure-Monitoring-Considering-Failures-of-UAVs-Reliability-Models-Rerouting-Algorithms-Industrial-Case.pdf (accessed August, 2024).
45. Herman Fesenko, Oleg Illiashenko, Vyacheslav Kharchenko, Ihor Kliushnikov, Olga Morozova, Anatoliy Sachenko and Stanislav Skorobohatko, Flying Sensor and Edge Network-Based Advanced Air Mobility Systems: Reliability Analysis and Applications for Urban Monitoring. *Drones* 2023, 7(7), 409; <https://doi.org/10.3390/drones7070409>
46. Yun Sun, Herman Fesenko, Vyacheslav Kharchenko, Luo Zhong, Ihor Kliushnikov, Oleg Illiashenko, Olga Morozova and Anatoliy Sachenko, UAV and IoT-Based Systems for the Monitoring of Industrial Facilities Using Digital Twins: Methodology, Reliability Models, and Application. *Sensors* 2022, 22(17), 6444; <https://doi.org/10.3390/s22176444>

Received (Надійшла) 24.08.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.11.2024

Mobile logistics and monitoring systems based on UAV swarms: challenges and development directions

O. Kriuchenkov, O. Morozova, T. Nikitina

Abstract. With the development of technology and the active digitalization of aspects of life from transport to trade, there is a growing need to create reliable mobile logistics systems based on swarms of unmanned aerial vehicles (UAVs). The use of UAV swarms can significantly improve the efficiency of logistics and monitoring operations, ensuring safety and optimizing costs through the collection and analysis of data for real-time decision-making. The main goal of this article is to review the methods and software tools that ensure the reliable operation of mobile logistics and monitoring systems based on UAV swarms. Key areas of activity are also considered with examples of their application, characteristic features, problems, limitations and advantages. The article also outlines the general challenges and limitations in this field. The paper proposes the concept of using UAV swarms to solve logistical and monitoring tasks that increase work efficiency and reduce the risk of unforeseen situations during the life cycle of operations. There are three main approaches to implementing such systems: autonomous UAV swarms, operator-controlled swarms, and hybrid systems. In addition, the application of UAV swarms in various fields of activity, such as the delivery of goods, monitoring of warehouses and infrastructure, as well as support of search and rescue operations, is considered. The concept of mobile logistics and monitoring systems based on UAV swarms can be implemented in almost all industries, but this article focuses on the most common areas that have significantly influenced the development of such systems. An analysis of the main fields of application of UAV swarms was carried out, the features and problems of their use in each of the considered spheres of activity were determined. The challenges, advantages and specifics of using UAV swarms were summarized.

Keywords: UAV swarms, mobile logistics systems, unmanned aerial vehicles, logistics efficiency, autonomous control systems, digitalization of logistics, big data processing, data security, standardization, fault tolerance, route optimization.

Mykyta Matvieiev

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

ANALYSIS OF OPTIMIZATION METHODS OF WEB RELATIONSHIPS WITH AUGMENTED REALITY

Annotation. Topicality. With the development of mobile and wireless technologies, AR has received a new post for integration into the full life, in particular with the help of WebAR. The technology is rapidly being introduced into other fields such as commerce, medicine and education. However, other technical challenges include standards for 3D technologies in web applications, which limit the quality and performance of AR applications. Optimizing these applications is an important aspect to improve the user experience and expand the application of AR in various industries. **The purpose** of this work is the analysis of optimization methods of web applications with augmented reality. **The object** of research is web applications with augmented reality. **The subject** of the study is methods of optimizing web applications with augmented reality. **The results.** The work analyzes methods of optimizing web applications with augmented reality. **Conclusion.** An analysis of the optimization methods of web applications with augmented reality was carried out.

Keywords: web, augmented reality, optimization.

Introduction

Augmented reality (AR) is a technology that provides enhanced perception of the physical world, giving users the opportunity to visualize, hear and interact with reality through superimposed multimedia content, which is characterized by a high level of interactivity and information saturation.

Since its inception in the 1950s, augmented reality has seen significant development in fields such as medicine, engineering, education, and more. At first, for its implementation in the real world, you used bulky and heavy equipment. Since 1997, AR has become a recognized research field covering various aspects: tracking, interaction, display, visualization, calibration and registration. The emergence of smartphones has opened up new opportunities for the development of the augmented reality application market.

The period of research devoted to the impact of mobile and wireless technologies on the development of augmented reality has begun. After 2010, researchers focused on the technical challenges and opportunities of AR application development, which further contributed to its integration into everyday life, particularly through browser-based AR applications (WebAR) for smartphones. Modern smartphones, equipped with cameras and such sensors as GPS, accelerometers and gyroscopes, are able to fully reveal the potential of augmented reality [1, 2].

Today, augmented reality is being actively implemented in various spheres of human life, in particular, in trade. However, at the initial stages of its development in this field there were certain difficulties due to investors' doubts about the maturity of the technology. At that time, games were the main driver of AR use. Currently, business models have evolved, and many companies are realizing the importance of investing in WebAR to expand their brand. As more and more brands integrate into e-commerce, competition in this market is intensifying. In order to stand out, businesses must implement innovative solutions to improve the user experience. AR allows consumers to preview a product, which solves the problem of choosing a design, color or size. Technology not only

attracts customers, but also increases their satisfaction and positively affects long-term purchase intentions. Today, many commercial sites support AR for selling clothes, furniture and cosmetics. For example, L'Oréal recently launched a website with AR to help customers choose cosmetics more easily online.

Over time, AR is increasingly used in the medical field, where it is useful for both doctors and patients. The technology is used during complex operations, allowing doctors to work with greater precision.

AR also improves education and training by integrating digital content into the real world. Students can use their smartphones or tablets to access AR content that provides interactive learning, exploring complex concepts, or performing virtual experiments.

In addition to commerce, medicine and education, WebAR is actively used in areas such as tourism, hospitality and entertainment. It is expected that the implementation of AR will continue to positively affect the markets of commerce, healthcare and real estate in the coming years. The growing number of studies in this area indicates that in the future sites with integrated AR technologies will be able to significantly improve user interaction with digital environments, providing everyday augmented reality [3, 4].

Based on the above, it can be concluded that the use of augmented reality in web applications has become popular in the modern context. However, the lack of web standards for the use of 3D technologies negatively affects the spread of WebAR applications, which leads to the creation of poorly optimized software solutions. This leads to a deterioration of interaction with the user and a limitation of the performance of the application - a decrease in the frequency of frames, an increase in the delay or an inefficient use of the device's resources, which affects the responsiveness and smoothness of the AR interaction.

So, based on the above, the research and optimization of currently common WebAR applications are relevant today, and the analysis of their optimization methods is expedient.

The purpose of this work is to analyze methods of optimization of web applications with augmented reality.

Main part

Optimizing 3D models plays a key role in reducing resource consumption and ensuring fast and smooth operation in WebAR environments, effectively minimizing latency and reducing content loading time. Excessively large or complex 3D models can slow down the operation of the site and reduce its sensitivity, which negatively affects the interaction with the user and can lead to the outflow of the audience. In turn, the application of optimization methods helps to improve the operation of the application and create a more comfortable user experience.

Significant delays in the visualization of the thickest model occur due to the use of a one-time mechanism for loading and rendering model data, which is based on the synchronous mode of data exchange. In synchronous mode, the client is forced to wait for the complete transfer of the entire model before it is loaded and displayed in the web application. In addition, low bandwidth or instability of the mobile wireless network causes additional delays in loading models. Combined with the site's limited computing resources, this can cause the page to look like it's frozen in the browser. The solution to this problem is the use of WebAR application optimization methods.

The asynchronous and decentralized method of transferring 3D models eliminates the network congestion that occurs during a one-time download. Asynchrony consists in the transfer of data in parts. For example, the process of data transfer of a three-dimensional model occurs gradually: first, the basic mesh of the model is transferred, and during its rendering on the client side of the web application, a file with refined data is simultaneously received. With the receipt of these data, the model is gradually detailed until complete restoration (Fig. 1). Decentralization, in turn, involves the use of several data sources for 3D models, which allows to evenly distribute the load and increase the transmission efficiency [5].



Fig. 2. Reducing object detail using LOD

This allows you to reduce the load on the system without a significant loss of visualization quality. Algorithms such as meshoptimizer focus on mesh optimization to improve performance, while multi-resolution methods offer efficient data compression and minimize CPU and GPU load. Hardware acceleration of tessellation and continuous LOD open perspectives for stable frame rates in high-quality AR applications.

With the development of machine learning technologies and neural networks, an updated method for implementing data storage and transmission of 3D models is proposed. The method is a Bayesian learning algorithm for reducing the complexity of coding using the multidimensional Gaussian distribution and the method of maximizing the expected value for subsets without affecting the visual quality of the model [6].



Fig. 1. The process of grid refinement has several stages

The use of model compression technology reduces the file size of 3D models, which increases their efficiency for storage and transmission through a web browser. Libraries such as Zstd and Oodle aim for fast decompression, but do not account for redundancy in vertex data, which can lead to low compression ratios. The Draco algorithm uses quantization and delta coding to reduce the accuracy of vertex attributes, although it does not prioritize texture quality. To optimize results, it may be useful to combine Draco with other texture compression methods, such as KTX2. The Corto library supports streaming, providing fast mesh topology reconstruction during decoding.

The method of data reduction of component similarity in the model increases the efficiency of the process of transfer and loading of models by reducing the amount of data that needs to be transferred. The method is based on the identification of similar parts of models that are the same or similar in the model and the elimination of redundant information. Similar components in the model are defined and represented by a single set of data. Instead of transferring multiple versions of the same geometry or texture, the data is compressed to avoid duplication.

The level of detail (LOD) method optimizes the use of computing resources, such as memory and processor, by dynamically adapting the model. This approach reduces the number of displayed details taking into account the distance, position and orientation of the user (Fig. 2).

Recently, an HTTP-adaptive streaming system for augmented reality was presented, which aims to provide high-quality streaming services with minimal delay in the conditions of variable wireless networks. The system uses progressive mesh technologies together with a metafile structure to optimize visualization and data transfer planning, taking into account the current network load. Unlike systems that depend on the viewing angle, this system adapts to network conditions and the scale of AR overlays on the screen, which ensures the optimization of transmitted fragments to improve the perception of visual content by the user [7].

In terms of rendering performance, there is no universally lightweight format for 3D files. The USDZ format, developed by Apple and Pixar, is compact and integrates augmented reality features into 3D content, but it

is designed for iOS and has limited creation tools. This creates a compatibility problem between the use of cross-platform SDKs and the specific capabilities of each platform. The glTF format, as well as its glb binary, provides efficient loading of 3D scenes in the browser, but different glTF renderers may produce different visual results. To optimize this process, frameworks such as gltfpack with meshoptimizer, which applies various optimization steps, and the Gltf pipeline from CesiumJS with support for Draco compression [8] can be used.

One of the ways to overcome the shortage of computing resources of mobile devices over the last decade has become mobile cloud computing, which allows users to upload intensive computing tasks to cloud servers deployed on remote cloud platforms for processing.

Additional aspects of optimizing web applications with elements of augmented reality are the on-demand downloading of resources, in particular animations and the implementation of model caching mechanisms in web applications [9].

Conclusions

Modern society actively uses web applications for a wide range of tasks, including buying and selling goods, receiving online services and searching for information. The global implementation of the 5G network creates the basis for the large-scale application of WebAR technology in various industries. Optimizing such applications becomes critical to ensure a quality user experience, es-

pecially when interacting with websites, where visualization and interactivity are key aspects. Further improvement of WebAR technologies will facilitate more effective integration with digital platforms and increase user satisfaction.

As a result, an analysis of methods of optimization of web applications with augmented reality was carried out. Optimization methods of 3D models, such as asynchronous loading, level of detail (LOD), and data compression, allow you to reduce delays and reduce the load on computing resources. A combination of compression methods (for example, Draco for geometry and KTX2 for textures) improves data transfer efficiency and reduces download times. Decentralization of data allows you to avoid network overload by evenly distributing the load between several sources.

A combination of different optimization methods can significantly increase the efficiency of processes in WebAR applications. For example, combining LOD for dynamic adaptation of the model with the Draco compression algorithm allows you to reduce the size of files and optimize the use of resources. Another option is asynchronous non-loading of models with gradual detailing in combination with KTX2 texture compression, which reduces network load and speeds up loading. Also, the distribution of the load between several sources of data transmission in combination with cloud computing allows you to transfer computing tasks to remote servers, reducing the load on local devices.

REFERENCES

1. Khan A., Khusro S. The Rise of Augmented Reality Browsers: Trends, Challenges and Opportunities // Pakistan journal of science. 2015. 67. P. 288-300. DOI: 10.57041/pjs.v67i3.624.
2. Siriwardhana Y., Porambage P., Liyanage M., Ylianttila M. A Survey on Mobile Augmented Reality With 5G Mobile Edge Computing: Architectures, Applications, and Technical Aspects // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2021. Vol. 23. No. 2. P. 1160-1192. DOI: 10.1109/COMST.2021.3061981.
3. Parekh P., Patel S., Patel N., Shah M. Systematic Review and Meta-Analysis of Augmented Reality in Medicine, Retail, and Games // Visual Comput. Ind. Biomed. Art. 2020. Vol. 3. No. 1. Article 21. DOI: 10.1186/s42492-020-00057-7.
4. Butt A., Ahmad H., Muzaffar A., Ali F., Shafique N. WOW, the Make-Up AR App is Impressive: A Comparative Study Between China and South Korea // Journal of Services Marketing. 2022. Vol. 36. No. 1. P. 73-88. DOI: 10.1108/JSM-12-2020-0508.
5. Li L., Qiao X., Lu Q., Ren P., Lin R. Rendering Optimization for Mobile Web 3D Based on Animation Data Separation and On-Demand Loading // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 88474-88486. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2993613.
6. Boutsis A.-M., Ioannidis C., Verykokou S. Multi-Resolution 3D Rendering for High-Performance Web AR // Sensors. 2023. Vol. 23. Article 6885. DOI: 10.3390/s23156885.
7. Noh H., Song H. HA2RS: HTTP Adaptive Augmented Reality Streaming System // IEEE Trans. Mob. Comput. 2023. Vol. 22. P. 2741-2755. DOI: 10.1109/TMC.2021.3132665.
8. glTF Runtime 3D Asset Delivery. Available online: <https://www.khronos.org/gltf/> (accessed on 20 October 2024).
9. Lentz W. R., Brutzman P. D., Kamburelis M. X3D and Gltf Model Differencing for Conversions. Comparison and Conformance Testing // Proceedings of the 26th International Conference on 3D Web Technology. 8 November 2021. P. 1-7. DOI: 10.1145/3485444.3493230.

Received (Надійшла) 22.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.11.2024

Аналіз методів оптимізації вебзастосунків з доповненою реальністю

Микита Матвєєв

Анотація. **Актуальність.** З розвитком мобільних і бездротових технологій, AR отримала новий поштовх для інтеграції у повсякденне життя, зокрема завдяки WebAR. Технологія швидко впроваджується у різні сфери, такі як торгівля, медицина та освіта. Однак існують технічні виклики, зокрема відсутність стандартів для 3D-технологій у вебзастосунках, що обмежує якість і продуктивність додатків AR. Оптимізація цих додатків є важливим аспектом для покращення користувацького досвіду і розширення застосування AR у різних галузях. **Метою даної роботи** є аналіз методів оптимізації вебзастосунків з доповненою реальністю. **Об'єктом дослідження** є вебзастосунки з доповненою реальністю. **Предметом дослідження** є методи оптимізації вебдодатків з доповненою реальністю. **Результати.** У роботі проаналізовано методи оптимізації вебдодатків з доповненою реальністю. **Висновок.** Проведено аналіз методів оптимізації вебзастосунків з доповненою реальністю.

Ключові слова: веб, доповнена реальність, оптимізація.

О. Мошура¹, Т. Деркач¹, А. Дмитренко¹, Л. Клочко², В. Лоза¹

¹ Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

² Федеральна політехнічна школа, Лозанна, Швейцарія

ОСОБЛИВОСТІ ТА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ LLM У СФЕРІ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Анотація. У даній статті досліджено ролі та можливості Великих Мовних Моделей (LLM) у сфері розробки програмного забезпечення, які варіюються від спеціалізованих, орієнтованих на конкретні мови або домени, до загальних моделей, які можуть застосовуватися до широкого спектру задач. Проведено огляд основних особливостей LLM, акцент на їхньому потенціалі у глибокому аналізі та генерації тексту, а також розкриває можливості застосування в широкому спектрі задач. Проаналізовано основні напрями щодо оптимізації роботи з LLM, які включають в себе контекст, fine tuning, векторизація інформації, використання вбудованого інструментарію платформ, prompt engineering, zero-shot prompting, few-shot prompting, chain-of-thought prompting, directional stimulus prompting, промпт з використанням dsp, промпт без використання dsp, tree of thought prompting, reward prompting, Developer driven LLM, Repository driven LLM, Project driven LLM. Детально аналізуються переваги та недоліки комерційних та відкритих (OpenSource) моделей. Представлено стратегії використання LLM моделей для розробників, як особистий досвід роботи з LLM та ідеї які ще доведеться реалізувати. Особливу увагу приділено концепціям, які орієнтовані на розробника, які надають підтримку та відповіді на основі великих даних та контексту проекту та включають в собі певні звички в кодуванні, вподобання до певних технологій чи бібліотек, і навіть специфічні доменні знання, які розробник застосовує у своїй рутинній роботі. Визначено необхідність враховувати, хто буде використовувати модель: лише розробники чи також замовники та користувачі, в залежності від аудиторії, адаптування рівня доступу до інформації. Сформовані ймовірні проблеми роботи з LLM з якими можуть зіткнутися розробники при роботі з великими мовними моделями, які можуть генерувати нерелевантні відповіді, містити помилкову інформацію чи створювати її (галюцинації), а також мати упередження та затримку у врахуванні останніх подій. Визначено людський фактор, як ключовий фактор в оцінці і користуванні результатами роботи мовних моделей, перед її впровадженням у проект. Робота призначена для інформування розробників про стратегії вибору та адаптації моделей LLM для специфічних вимог проєктів з урахуванням їхнього контексту.

Ключові слова: Великі Мовні Моделі, штучний інтелект, fine-tuning, векторизація, OpenSource.

Вступ

У сучасному світі технологій та швидкоплинної інформації, розробники постійно шукають шляхи оптимізації своїх робочих процесів.

Інтеграція мовних моделей може стати революційним кроком для оптимізації процесу розробки, надаючи додаткові ресурси для аналізу, творчості та інновацій, завдяки використанню штучного інтелекту. Використання таких потужних інструментів розробниками змінює вектор розвитку програмування.

Мовні моделі вносять значний вклад у пошук швидких та ефективних рішень для складних завдань, дозволяючи розробникам зосередитися на більш критичних та творчих аспектах своїх проєктів.

Метою даної роботи є дослідження ролі та можливостей Великих Мовних Моделей (LLM) у сфері розробки програмного забезпечення.

Основна частина

LLM (Large Language Model, Велика Мовна Модель) – тип штучного інтелекту, який може аналізувати та генерувати текст. Ці моделі тренуються на великих масивах інформації (звідси й назва "Велика").

Простіше кажучи, ВММ – це комп'ютерна програма, яка отримала достатньо прикладів, щоб розпізнавати та інтерпретувати людську мову на глибокому рівні.

Такі моделі використовуються для широкого спектру завдань, від автоматичного генерування тексту до аналізу емоційного забарвлення (сентимент-аналізу), відповідей на запитання, автоматичного перекладу та багато іншого.

Особливістю LLM є їх здатність не просто працювати з текстом на поверхневому рівні, але й розуміти нюанси та контекст мови, що робить їх надзвичайно потужним інструментом в галузі штучного інтелекту.

Моделі. У більшості випадків, коли говорять про LLM у популярних медіа, акцент робиться на великих комерційних моделях, таких як ChatGPT від OpenAI, Gemini (також відомий як Bard) від Google, або Claude від Anthropic.

Ці моделі є дуже відомими прикладами використання LLM для створення потужних інструментів генерації тексту, діалогових систем та інших додатків.

Проте, у більшості ці моделі закриті, а застосунки можуть читати повідомлення з переписок користувачів, що не є рекомендовано для NDA проєктів.

Наразі існує велика кількість моделей LLM різної спрямованості, багато з яких є відкритими (OpenSource) і доступними для використання та модифікації спільнотою.

Ці моделі варіюються від спеціалізованих, орієнтованих на конкретні мови або домени, до загальних моделей, які можуть застосовуватися до широкого спектру задач.

Більшість відкритих моделей можна переглянути на сайті huggingface.co, там публікують свої моделі як і більшість провідних ІТ компаній, так і стартап команди, чи навіть звичайні ентузіасти. А великим плюсом цієї платформи є можливість підняття будь якої моделі в приватному репозиторії що дозволяє зекономити час і кошти на тестування.

У сучасних реаліях розробники мають обирати ШІ асистента так само ретельно, як і колір інтерфейсу у своїй IDE.

Контекст. Розширення контексту для мовних моделей є ключовим фактором для отримання більш релевантних та точних відповідей.

Нижче представлені декілька підходів, які можуть допомогти розробникам покращити взаємодію з LLM.

Fine tuning. Fine-tuning дозволяє адаптувати загальну модель під конкретні потреби проекту. Це досягається шляхом додаткового навчання моделі на меншому, специфічному наборі даних, який відображає особливості завдань, з якими модель буде працювати.

Переваги: збільшення точності відповідей у специфічних доменах, краще розуміння контексту завдання.

Недоліки: потребує додаткових даних для тренування, може зайняти додатковий час та ресурси.

Векторизація інформації. Векторизація інформації передбачає перетворення текстових даних у вектори чисел, які мовна модель може ефективніше обробляти. Це може допомогти моделі краще розуміти відносини між словами та концепціями у запиті.

Переваги: покращене розуміння нюансів мови, здатність моделі виявляти зв'язки між різними елементами контексту.

Недоліки: потребує розуміння процесів векторизації та оптимізації моделі під векторизовані дані.

Використання вбудованого інструментарію платформ. Багато платформ, що надають доступ до LLM, також пропонують інструменти та API для роботи з контекстом.

Ці інструменти можуть допомогти розробникам керувати контекстом запитів та відповідей більш ефективно.

Переваги: зручність використання, оптимізовані під конкретну платформу рішення, які можуть полегшити роботу з контекстом.

Недоліки: залежність від можливостей та обмежень конкретної платформи, потенційна необхідність адаптації до специфіки інструментарію.

Prompt engineering. Для того щоб отримати бажану відповідь, треба правильно прописати промпт (запит) до такої моделі. Зазвичай це питання: "Чому Python 2 вже не підтримується?" або інструкція: "Напиши рецепт для вечері, якщо у мене є кіло картоплі".

Більше інформації про техніку промптингу можна отримати на ресурсі <https://www.promptingguide.ai/techniques> [1]. Всі відповіді на промпти були згенеровані через модель gpt-4 від OpenAI

Поради.

1. Починайте з простого. При продумуванні промпту важливо розуміти що це творчий процес, який вимагає певного часу для отримання оптимальних результатів. Важливо послідовно покращувати свій промпт із плином спроб додаючи певні деталі або відрізаючи непотрібний контекст

2. Уникайте неточностей. Завжди вказуйте що вам конкретно треба. Якщо ви очікуєте на якийсь результат то варто його вказати в промпті. "Напиши мені два речення про LLM для розробників" виглядає набагато краще ніж "Розкажи коротко що таке LLM".

3. Вказуйте контекст. Уявіть що ви розмовляєте з колегою щодо певного нового функціоналу в коді. Питання "Чому функція `get_weather()` не повертає інформацію?" викличе тільки ще більше питань у вашого колеги.

Так і з мовними моделями.

Звідки вони знають що це за метод. Додайте додатковий контекст у вигляді шматку коду, очікуваного реального результату, трейсбек, і т.д.

Наприклад:

1. "Дай мені поради щодо програмування." – можна замінити на: "Дай мені п'ять порад для початківців у Python."

2. "Чому мій код не працює? [помилковий код]" – варто замінити на: "Мій Python код видає помилку 'IndexError: list index out of range' в цьому фрагменті кода: [помилковий код]. Як це виправити?"

3. "Розкажи мені щось цікаве про ШІ в ІТ." – можна покращити через: "Які основні зміни в індустрії ІТ принесла штучний інтелект за останні 5 років?"

4. "Покращи код: [код]." – варто замінити на: "Як можна оптимізувати цей фрагмент коду на Python для кращої продуктивності при роботі з великими списками? [код]"

5. "Як зробити щось круте у програмуванні?" – можна замінити на: "Як створити веб-додаток із використанням React та Python для управління проектами?"

Zero-shot prompting. Простими словами промпт без прикладів. Ідеально для питань які не вимагають від вас додаткової інформації, наприклад:

Ви: "Чи кавун це фрукт?"

LLM: "Ні, це ягода."

Ви: "Як зробити HTTP GET запит в Python?"

LLM: "Використовуйте вбудовану бібліотеку `urllib`, або `requ...`"

Ви: "Що треба для відправки звітності по ФОП?"

LLM: "Для відправки звітності по ФОП (фізичній особі-підприємцю) в Україні..."

LLM на то і є "Великими Мовними Моделями" щоб мати змогу відповісти на загальні питання

Few-shot prompting. Це промптинг з додаванням прикладів. Спосіб також зосереджений на нескладних питаннях чи інструкціях, бажано не використовувати його для складних тем.

Chain-of-Thought prompting. Ланцюжок думок – це ідеальний тип промптів коли ви отримуєте неправильний результат на складне питання. Його використання досить елегантне, варто дописати до свого промпту: "Думай послідовно" чи "Розпиши крок за кроком"

Ви: "Коли мені було 6 років, моя сестра була вдвічі молодша. Зараз мені 70 років, скільки років моїй сестрі?"

LLM: "Сестрі 35 років."

Так як мовні моделі не виконують математичні операції вони схильні відповідати закономірно. Тому спробуємо такий підхід

Ви: "Коли мені було 6 років, моя сестра була вдвічі молодша. Зараз мені 70 років, скільки років моїй сестрі? Розпиши крок за кроком".

LLM: "Коли вам було 6 років, ваша сестра була удвічі молодша, тобто їй було $6/2 = 3$ роки. Різниця у віці між вами та вашою сестрою завжди буде однаковою, тобто $6 - 3 = 3$ роки. Таким чином, вашій сестрі зараз $70 - 3 = 67$ років"

Також цей тип промптингу можна розширити за допомогою Few-shot prompting задля отримання найбільш релевантного результату

Directional Stimulus Prompting. Спрямоване стимулювання – це промптинг у якому ви додаєте підказки або спрямовуєте на якусь відповідь. Наприклад при генерації підсумку зі статті можна вказати "підказки" того що ви хочете бачити в результаті.

Наприклад, контекст "Сонячна енергія - це чисте та відновлюване джерело енергії, яке отримують за допомогою сонячних панелей, що перетворюють сонячне світло на електрику. Цей метод виробництва електроенергії не лише допомагає знизити вуглецевий слід, але й може забезпечувати значні економічні переваги, зокрема зниження рахунків за електроенергію.

Незважаючи на початкові високі витрати на установку, сонячні панелі часто окупаються протягом декількох років, пропонуючи довгострокове рішення для виробництва енергії."

Промпт з використанням DSP:

Ви: "Підкресліть екологічні та економічні переваги використання сонячної енергії на основі наведеного тексту."

LLM: Сонячна енергія знижує вуглецеві викиди та забезпечує економію на рахунках за електроенергію, швидко окупаючи початкові витрати на установку.

Промпт без використання DSP:

Ви: "Узагальніть текст про сонячну енергію."

LLM: Сонячна енергія перетворює світло на електрику, забезпечуючи екологічні та економічні переваги, незважаючи на високу початкову вартість.

Tree of Thought Prompting. Дерево думок – це тип промптингу для складних задач, де прості методи вже не допомагають вирішити проблему, або обгрунтованості їх відповідей недостатньо. При використанні цього підходу треба визначити кількість кандидатів та кроків після яких буде отримано відповідь.

Reward Prompting. Цей підхід промптингу, включає систему винагород або стимулу для моделі, для того щоб вона могла самостійно оцінювати якість своїх відповідей.

Також він ефективний в ітеративному процесі – мовна модель вже знає на основі попередніх відповідей що вам треба, а що ні.

Типи використання LLM моделей для розробників. Стратегії використання описані в дослідженні – це особистий досвід роботи з LLM та ідеї які ще доведеться реалізовувати.

Тут згадано механіки які можна застосовувати як індивідуальному розробнику так і командам або навіть компаніям для пришвидшення бізнес процесів.

Developer driven LLM. Концепція мовної моделі, яка орієнтована на розробника.

Для того щоб отримувати релевантні відповіді від мовних моделей, уникаючи базових відповідей "А чи ви спробували перезапустити ПК" розробник може "розказати" трохи про себе, адаптувавши модель до його персонального досвіду, стилю роботи, або конкретних потреб у проєктах.

Це може включати в себе певні звички в кодуванні, вподобання до певних технологій чи бібліотек, і навіть специфічні доменні знання, які розробник застосовує у своїй рутинній роботі.

Елементи контексту:

1. CV. Це встановить рамки стеку для LLM і дасть розуміння того, що розробник знає, а про що варто розказати. Якщо CV немає то в контекст можна додати таку інформацію як:

a. спеціалізація та напрямки роботи. Наприклад Backend Development чи Data Science чи Automation QA;

b. мови програмування які розробник знає. Варто виділити основні, якщо їх декілька;

c. технології. Наприклад Postgres, Docker, Redis, GraphQL і т.д.;

d. інструментарій та сервіси (Git, Jenkins, Github, Gitlab, Heroku і т.д.);

e. фреймворки та бібліотеки з якими розробник працює.

2. Слабкі сторони та нові знання. Зазначення областей, де розробник відчуває нестачу досвіду або тільки починає вчитися.

3. Проєкти та портфоліо. Детальний опис зроблених проєктів, включаючи використані технології, вирішені проблеми, роль розробника у проєкті та досягнуті результати. Це допоможе моделі краще розуміти досвід розробника та його спеціалізацію.

4. Освітній фон. Інформація про формальну освіту та самоосвіту, включаючи курси, сертифікати та спеціалізовані тренінги. Це надасть моделі уявлення про теоретичні знання та вміння розробника

5. Звички при розробці. Розуміння особливостей робочого процесу розробника, таких як підходи до тестування, використання систем контролю версій, стиль кодування, може допомогти моделі надавати поради, що відповідають цим звичкам.

Repository driven LLM. Це концепція мовної моделі, яка аналізує інформацію проєкту в репозиторіях, включно з кодом, змінами, запитами на злиття, проблемами та документацією.

Це дозволяє моделі надавати точніші відповіді та рекомендації, враховуючи контекст розробки.

Щоб покращити аналіз та зменшення кількості надлишкової інформації, модель може використовувати стратегії:

1. Оптимізація коду. Вносить оголошення класів, методів і констант у окремий файл, векторизує їх для швидкого пошуку, потім виконує кроки:

- a. Пошук декларацій за запитом.
- b. Додавання коду відповідних декларацій до контекста запитування.

2. Сумаризація обговорень. Замість повного тексту обговорень, модель створює їхній короткий зміст з ключовою інформацією, потім:

- a. Пошукує заголовки та документацію.
- b. Додає аналізований зміст до контекста запитування.

3. Кешування даних. Зберігання часто запитуваних даних у кеші може значно прискорити доступ до них і зменшити час відповіді моделі. Це особливо корисно для повторюваних запитів

4. Семантичне групування. Застосування методів машинного навчання для семантичного групування схожих запитів, іш'ю, пул-ріквестів та документації дозволяє виявляти загальні теми або проблеми, а також може пришвидшити відповідь від мовної моделі

І вже на основі застосованих стратегій така мовна модель буде готова для відповіді на питання. Її можна застосовувати:

1. Новим розробникам. Для входження в новий проєкт і для оптимізації часу отримання відповіді замість обговорення з іншими розробниками.

2. Для швидкого відновлення у пам'яті старого коду.

3. Для продумування стратегій рефакторингу.
4. Для пошуку вразливостей у коді.

Project driven LLM. Концепція "Project Driven LLM" втілює в собі глибоке інтегрування в проєктні процеси, аналізуючи та адаптуючи інформацію не лише з репозиторіїв, але й з обговорень, зворотного зв'язку від користувачів та замовників. Це дозволяє створити багатоплановий контекст, збагачений різноманітними джерелами даних, які відображають реальну картину проєкту.

В собі така мовна модель повинна містити усі пов'язані репозиторії проєкту (наприклад, мікросервісна архітектура, чи окремі репозиторії для Android, IOS, WEB) а також в неї варто додати:

1. Сумаризація обговорень розробників. Простими словами можна сумаризувати чат розробників (подобово, потижнево і т.д.) відфільтрувавши лише технічні дискусії для швидкого пошуку обговорень

2. Сумаризація обговорень з клієнтами та замовниками. Зведення до мінімуму комунікації з замовниками та клієнтами дозволяє виявити ос-

новні вимоги та очікування, забезпечуючи точне розуміння проєктних цілей. Цей процес гарантує, що фінальний продукт максимально відповідає потребам користувачів.

3. Сумаризація фідбеку від користувачів. Аналіз відгуків користувачів є невід'ємною частиною процесу розробки, оскільки він надає цінне бачення того, як продукт використовується в реальному житті та як його можна покращити.

4. Прогнозування потреб проєкту

5. Інтеграція машинного навчання для аналізу існуючих даних проєкту може допомогти в автоматизації прогнозування майбутніх потреб розробки, зокрема щодо ресурсів, часу на реалізацію та потенційних ризиків.

6. Визначення пріоритетів розробки. Оцінка критичності задач і функціоналу дозволяє оптимізувати порядок реалізації проєктних робіт, зосереджуючись на найбільш значущих аспектах для досягнення стратегічних цілей.

При цьому, важливо враховувати, хто буде використовувати модель: лише розробники чи також замовники та користувачі. В залежності від аудиторії, необхідно адаптувати рівень доступу до інформації

Ймовірні проблеми роботи з LLM.

Мовні моделі можуть бути потужним інструментом для розробників, надаючи підтримку та відповіді на основі великих даних та контексту проєкту. Однак, не всі результати, які вони генерують, завжди ідеально відповідають потребам користувачів.

Нижче наведені деякі можливі проблеми, з якими можуть зіткнутися розробники при роботі з великими мовними моделями:

1. Нерелевантні відповіді. Незважаючи на великий обсяг знань, великі мовні моделі можуть генерувати відповіді, які не відносяться до суті поставленого запитування. Це може бути результатом неправильного інтерпретування запиту або недоліків структури знань моделі.

2. Помилкова інформація. Мовні моделі покладаються на навчальні дані для генерування відповідей, і якщо ці дані містять помилкову інформацію, LLM може реплікувати ці помилки у своїх відповідях.

3. Галюцинації. Іноді мовні моделі можуть "галюцинувати" відповіді – творити факти або дані, які не мають підстав в дійсності. Це особливо проблематично в технічних або наукових контекстах, де точність критично важлива.

4. Затримка у врахуванні останніх подій. Великі мовні моделі часто відстають щодо включення останніх новин або трендів у свою базу знань через цикли оновлення. Це може призводити до того, що поради або аналізи здійснюються на основі застарілої інформації.

5. Упередження і стереотипи. Кожна мовна модель несе у собі приховані упередження, які беруться з даних, на яких вона навчалася. Це може включати гендерні, расові чи культурні упередження, що може відобразитись у відповідях мо-

делі та спотворювати загальний контекст спілкування з розробниками.

Висновки

Враховуючи вищезазначене, можна констатувати, що:

1. Великі Мовні моделі (LLM) є незамінним інструментом у арсеналі розробника, подібно до того як молоток є ключовим інструментом для будівельника. Вони підвищують продуктивність та ефективність, забезпечуючи підтримку в аналізі великих обсягів даних.

2. Для отримання точніших відповідей від мовної моделі, необхідно надавати їй багатий та релевантний контекст, але при цьому додавати лише інформацію, що безпосередньо пов'язана з поставленим запитанням.

3. Взаємодія з мовними моделями часто є ітеративним процесом, що вимагає пошуку правильних

промптів та коригування запитів для отримання необхідної інформації.

4. Розробка спеціалізованих мовних моделей для конкретних проєктів може суттєво скоротити час розробки та прискорити пошук необхідної інформації, оскільки такі моделі оптимізовані для специфічних вимог проєкту.

5. Незважаючи на їх користь та зручність, мовні моделі не є бездоганними. Вони можуть генерувати нерелевантні відповіді, містити помилкову інформацію чи створювати її (галюцинації), а також мати упередження. Виходячи з цього, фінальне рішення має прийматися людиною на основі критичного аналізу відповідей моделі.

6. Людський фактор залишається ключовим в оцінці і користуванні результатами роботи мовних моделей, і розробникам слід ретельно перевіряти інформацію, отриману від LLM, перед її впровадженням у проєкт.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- (2024), "Prompting Techniques (Техніки промптингу)", *Prompt Engineering Guide*, URL: <https://www.promptingguide.ai/techniques/>
- Jason Wei, Maarten Bosma, Vincent Y. Zhao, Kelvin Guu, Adams Wei Yu, Brian Lester, Nan Du, Andrew M. Dai, and Quoc V. Le (2022), "Finetuned language models are zero-shot learners", *Published as a conference paper at ICLR 2022*, pp. 1–46, URL: <https://arxiv.org/pdf/2109.01652.pdf>
- Tom B. Brown, Benjamin Mann, Nick Ryder, Melanie Subbiah, Jared Kaplan, Prafulla Dhariwal, Arvind Neelakantan, Pranav Shyam, Girish Sastry, Amanda Askell, Sandhini Agarwal, Ariel Herbert-Voss, Gretchen Krueger, Tom Henighan, Rewon Child, Aditya Ramesh, Daniel M. Ziegler, Jeffrey Wu, Clemens Winter, Christopher Hesse, Mark Chen, Eric Sigler, Mateusz Litwin, Scott Gray, Benjamin Chess, Jack Clark, Christopher Berner, Sam McCandlish, Alec Radford, Ilya Sutskever, Dario Amodei (2020), *Language Models are Few-Shot Learners*, aXiv:2005.14165, 75 p., URL: <https://arxiv.org/abs/2005.14165>
- Jason Wei, Xuezhi Wang, Dale Schuurmans, Maarten Bosma, Brian Ichter, Fei Xia, Ed Chi, Quoc Le, Denny Zhou (2022), *Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models*, 14 p., URL: <https://arxiv.org/abs/2201.11903>
- Zekun Li, Baolin Peng, Pengcheng He, Michel Galley, Jianfeng Gao, Xifeng Yan (2023), *Guiding Large Language Models via Directional Stimulus Prompting*, 27 p., URL: <https://arxiv.org/abs/2302.11520>
- Shunyu Yao, Dian Yu, Jeffrey Zhao, (2023), *Tree of Thoughts: Deliberate Problem Solving with Large Language Models*, 14 p., URL: <https://arxiv.org/abs/2305.10601>

Received (Надійшла) 20.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.11.2024

Features and capabilities of LLM application in software development

O. Moshura, T. Derkach, T. Dmytrenko, A. Dmytrenko, V. Loza

Abstract. This article explores the roles and capabilities of Large Language Models (LLMs) in software development, ranging from specialized models targeted at specific languages or domains to general models applicable to a wide array of tasks. It provides an overview of the key features of LLMs, emphasizing their potential for deep analysis and text generation, and reveals opportunities for their application across various challenges. The article analyzes primary directions for optimizing interactions with LLMs, which include context management, fine-tuning, information vectorization, leveraging built-in tools from platforms, prompt engineering, zero-shot prompting, few-shot prompting, chain-of-thought prompting, directional stimulus prompting, prompts using domain-specific prompts (dsp), prompts without using dsp, tree of thought prompting, reward prompting, Developer-driven LLMs, Repository-driven LLMs, and Project-driven LLMs. It details the advantages and disadvantages of both commercial and open-source models. Strategies for utilizing LLMs by developers are presented, drawing on personal experiences with LLMs and ideas yet to be realized. Special attention is given to developer-oriented concepts that provide support and responses based on large datasets and project context, including coding habits, preferences for specific technologies or libraries, and even specific domain knowledge that developers apply in their routine work. The necessity of considering who will use the model—whether developers, clients, or end-users—is emphasized, highlighting the importance of adapting the level of access to information based on the audience. Potential issues that developers may encounter when working with LLMs are identified, including the generation of irrelevant responses, misinformation or "hallucinations," as well as biases and delays in accounting for recent events. The human factor is identified as a critical element in evaluating and utilizing the outputs of language models before their implementation in a project. This work aims to inform developers about strategies for selecting and adapting LLMs to meet the specific requirements of projects while taking their context into account.

Keywords: Large Language Models, artificial intelligence, fine-tuning, vectorization, OpenSource.

Murad Omarov¹, Vusala Muradova²

¹ Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

² Lankaran State University, Lankaran, Azerbaijan

CYBERSECURITY PROBLEMS IN THE OIL AND GAS INDUSTRY

Abstract. Due to the widespread use of digital and Internet technologies in all processes of the oil and gas industry's production cycle, cybersecurity is becoming an increasing threat. Therefore, today cybersecurity is becoming one of the priorities of technological development of oil and gas companies. The article provides a brief description of the digital transformations taking place in the oil and gas industry, analyzes the main new cybersecurity threats and provides information on cybersecurity incidents. The issue of developing new technologies based on deep learning for smart oil fields is considered.

Keywords: oil and gas industry; digital mining; OT; IoT; cybersecurity.

Introduction

Currently, the oil and gas industry is going through a transitional period accompanied by a number of serious problems, this transitional period is characterized by a sharp drop in oil prices on world markets and chaotic fluctuations, depletion of light oil reserves, expansion of the heavy oil phase (heavy oil due to both its density and complexity of production), characterized by deepening competition between the leading players in the industry (transnational oil companies, oil-producing countries).

One of the main characteristics of this transition period is the widespread use of intelligent information technologies throughout the entire production cycle. It should be noted that large multinational oil and gas companies now have special departments dealing with intelligent oil and gas field technologies. Such companies are Shell ("Smart Fields"), BP ("Field of the Future"), Chevron ("iFields"), as well as Saudi Aramco, Petrobras, Kuwait Oil and others. Oil and gas companies Optimization of various oil and gas production processes using technologies such as the Internet of Things (IoT), cloud technologies, Machine Learning (machine learning, algorithms that learn during data processing), high-performance computing (data processing). large amounts of data) are working on the development of methods [1, 2]. The application of these technologies allows finding new methods to improve the efficiency of oil and gas field development, increase oil recovery rates and reduce costs.

At the same time, the oil and gas industry is facing new threats due to the widespread use of digital technologies and increased dependence on cyber structures. Cyberattacks on oil and gas facilities can be targeted at a variety of purposes: cyberterrorism, industrial espionage, sabotage of operations, data theft, etc. Oil and gas companies are forced to take various measures to prevent the legal, operational and technical risks they face in cyberspace.

1. Classification of the oil and gas industry

The oil and gas industry has different sectors, which include crude oil production, refining and the retail distribution network. In the English-language literature, these sectors are referred to as Upstream, Midstream and Downstream, respectively.

Upstream - generally, organisations involved in exploration - includes oil and gas exploration and production. Oil and gas exploration includes prospecting, seismic surveying and drilling for the purpose of developing oil and gas fields. Upstream often includes the well, wellhead, completion and reservoir, while downstream includes production and processing.

Midstream - includes the transportation, processing and storage of oil. This usually includes gas processing plants, LNG plants, and oil and gas pipelines.

Downstream includes oil refining, petrochemicals and retail.

2. Exploitation technologies in the oil and gas industry

Along with IT technologies, industrial automation technologies are widely used in the oil and gas industry. The term "operational technology" is used to demonstrate the technological and functional differences between traditional IT systems and industrial control systems. Operational technologies are hardware and software used to monitor and change the physical state of a system.

Operational technologies include industrial automation and control systems such as SCADA (supervisory control and data acquisition systems), DCS (distributed control systems), PLC (programmable logic controller), open platform communication servers, devices, and analyzers.

Rational technologies are used to monitor and control physical processes in the oil and gas sector; the data obtained on process parameters are used to automate processes.

Automation is possible with the help of electrical, mechanical, hydraulic, pneumatic actuators and control valves.

The integration of IT and OT technologies is now increasing, and devices are connected to the corporate network and external networks [3]. Attackers who can easily connect to control devices can cause even more damage. It is not only about the damage caused by stopping the technological process, but also about the possibility of causing physical damage - for example, a fire or explosion may occur at oil refineries and petrochemical plants. This scale of cybersecurity risks brings them to the national level [4].

3. Key cybersecurity threats in the oil and gas industry

Analytical company DNV GL has compiled a list of the ten most pressing cybersecurity threats to companies operating on the Norwegian continental shelf [5]. Obviously, these threats can be applied to other oil and gas companies around the world:

1. Lack of awareness and training of employees in the field of cybersecurity
2. Remote work during operation and maintenance
3. Use of standard IT products with known gaps in the production environment
4. Limited cybersecurity culture among vendors, suppliers and contractors
5. Insufficient separation of data networks
6. Use of mobile and storage devices, including smartphones
7. Data networks between land and sea facilities
8. Data centre premises, offices, etc. inadequate physical security
9. Sensitive software
10. Outdated and unusable management systems at enterprises

These gaps in cybersecurity can be overcome with a risk-based approach [6]. An international survey of 1,100 professionals conducted by DNV GL found that while companies are actively managing their information security, only just over half (58%) have adopted a specific management strategy and only 27% have set specific goals.

Note that IT and OT are created for different missions, so ownership and responsibility is fragmented across the organisation. The nature of new threats is related to attacks through IoT devices. The number of sensors, transmitters, and smart industrial systems connected to the network is growing rapidly, and hackers are finding new ways to connect to the network. The characteristic of IoT devices is that their computing power is low and it is difficult to build security systems on them, including mutual authentication and traffic encryption.

Another threat is caused by the increasing interdependence of systems, forming links in a single production chain. In [7], it is emphasised that a cyberattack on any element of the supply chain affects all other nodes.

4. Cybersecurity incidents in the oil and gas industry

The history of software incidents in the oil and gas industry goes back to the 1980s. In his book *Into the Abyss*, Thomas Reed, a senior US national security official, described how the US allowed SSRI to steal the codes for its pipeline monitoring programme from a Canadian company.

The malicious code embedded in this programme caused a massive explosion on the Trans-Siberian Pipeline in June 1982. The Trojan was activated during a pressure test on the pipeline, dramatically increasing the normal pressure and causing an explosion [8].

In the winter of 2002-2003, during a cyberattack on PDVSA (Petróleos de Venezuela, S.A.) systems, hackers

managed to penetrate the SCADA system responsible for loading tankers at a marine terminal in eastern Venezuela. The hackers prevented the loading of the tanker for eight hours by deleting a programme in the PLC. The attackers' tactics were not perfect, and the problem was the relatively easy detection and restoration of the PLC programs from backups.

Here is a brief chronicle of the history of cybersecurity incidents that have occurred in the oil and gas industry.

2009 - A computerized monitoring system in Bayamon, Portugal, failed, causing an explosion of a tank filled with gasoline and a three-day fire.

2010 - The Stuxnet virus was used to take over industrial control systems around the world, including computers used to run oil refineries, pipelines, and power plants.

2012 - Saudi Aramco, the world's largest oil producer, became the victim of a large-scale cyberattack. The oil giant announced that 30,000 computers were infected with the virus. A group of hackers called Cutting Sword claimed responsibility for the attack on Saudi Aramco. They infected the company's systems with malware for political reasons [9,10].

2012 - Telvent, a provider of remote control and monitoring tools for the energy sector, suffered a breach of its internal firewall and security systems. According to Telvent, every Fortune 100 energy company uses its systems. The attackers stole files related to the SCADA project, a remote control tool that allows you to connect outdated IT equipment to Smart Grid technologies. Most likely, the hackers were trying to find holes in the software to directly attack energy companies, so they were looking for the source code.

2012 - Ugly Gorilla attacked more than two dozen American gas companies, stealing confidential data from gas pipeline companies.

2012 - The computer system of RasGas, the leading LNG exporter in Qatar, was infected with an unknown virus, which led to the company's closure for several days [11,12,13].

2012 - The popular Flame malware was used to spy on a company in the Middle East. The malicious program has the ability to record audio, screenshots, and user actions.

2014 - Hackers attacked about 300 different companies in the Norwegian oil and gas industry, including Statoil. The attack was carried out via email. When the email was opened, malware was downloaded and security holes were discovered.

2015 - It was discovered that online attackers were remotely controlling ATG (Automated Tank Gauges) devices used to measure gasoline levels at retail stations in the United States. The attackers could cut off the fuel supply to the ATGs.

2017 - Oil and gas companies were attacked by the global ransomware Petya [14-16].

5. Scada systems security standards

Companies turn to standards to ensure the security of their SCADA systems [6]. The ISA-99.02.01 standard, approved by the American National Standards Institute

(ANSI), is one such standard (Security for Industrial Automation and Control Systems). The standard defines seven key steps for establishing a cybersecurity management system (KMS) for SCADA and control systems.

The steps of ISA-99.02.01 fall into three main categories: risk analysis, risk management through KMS, and monitoring and improvement of KMS. The first category establishes milestones for both assessing the current security situation and determining what security objectives it wants to achieve.

The second category reflects the processes for defining security policy, security organisation and security awareness in the company, and provides recommendations for security measures to improve SCADA security. The key idea in this category is a concept known as defense in depth, where security solutions are carefully deployed at multiple levels to prevent cyber attacks.

The Network and Information Security Directive (NISD), which came into force in the European Union in May 2018, ensures that energy companies' network and information systems meet minimum cybersecurity standards. The UK National Cyber Security Centre has developed detailed guidance on the requirements for compliance with this Directive.

The directive refers to operators of 'essential services', which will apply to many energy companies. Along with electricity producers and transmitters, and oil and gas producers and distributors

the companies involved are also covered by this Directive. The Directive requires Member States to introduce 'appropriate policies and regulatory measures to achieve and maintain a high level of security of network and information systems', as well as an obligation to report incidents. The Directive provides for 'effective, proportionate and impartial' sanctions for non-compliance with the relevant standards and failure to report incidents.

6. Security issues at the layers in IoT architecture

The technical solutions used by companies in the oil and gas value chain are known as the Internet of Things (IoT). The IoT is a dynamic, large-scale environment where things are connected to a network and transmit data through software, sensors, and receivers [19]. IoT involves the collection, analysis, and action of data created by a network of objects and machines. An IoT device is a computer, laptop, smartphone, tablet, etc. with Internet access. In addition to these devices, it also includes Internet access for other traditional "unintelligent" devices and things. All events occurring in the environment can be monitored with the help of numerous small-sized receiving devices (sensors) using wireless technology. However, storing big data collected from sensors requires storage with a large capacity.

As you know, IoT can aggregate and analyze constantly changing data, which is necessary for making decisions driven by it. In the current industrial environment, oil and gas companies handle data the same way they handle hydrocarbons; data needs to be generated, transmitted,

stored, and processed. With the development of IoT strategies, oil and gas enterprises are trying to capitalize on the era of "digital transformation".

In today's digital era, information can often flow from the mine to the operational process network, then to the corporate network, and finally to the end user, and vice versa. This also includes trojans, malware, ransomware, viruses, etc. means that such cyber threats exist. People move from the Internet to the corporate network, from the corporate network to the ERP network, and from there to the industrial network. The conclusion from this point is very critical - if there are cyberattacks on oil and gas organizations, the consequences will be very serious.

Areas of application of IoT

The scope of the IoT concept is very broad. For example, the oil and gas industry, environmental monitoring, smart homes, smart transportation management, e-medicine, etc. can be widely used in various fields. As an example, it can be noted that as a result of the integration of the industrial concept and the IoT concept, intelligent devices involved in production processes will achieve minimization of human error, real-time evaluation by decision support systems. processing. This will lead to improved production quality, reduced financial costs by ensuring optimal use of resources and the production of competitive products.

1) Industrial IoT devices [20]: The use of existing industrial automation systems together with IoT devices has many important advantages:

- Smart devices with IoT functions can control the production process and minimize operator intervention by creating automatic communication with each other over the network;

- Recovery/protection measures against predictable failures can be implemented by preliminarily identifying possible errors;

- Shortage of raw materials to produce products of plants or companies can be ensured in a timely manner by determining in advance;

- Control issues at plants or companies can be carried out from anywhere in the world. Thus, information about the production process and malfunctions that have occurred is available from anywhere via a network connection.

The architecture of the Internet of Things.

Data collected from receiving devices/sensors placed on objects in the fields is continuously transmitted to the monitoring and control center via RFID or any wireless transmission medium, which is monitored online in real time. By functionality, the IoT architecture is divided into the following levels (Table 1)/

The application of existing data security solutions to the IoT concept requires transmission environments that are not secure at a serious level, are dynamic and large-scale, have a large number of devices of different origins, etc. is not considered effective for reasons such as Given that large amounts of data contain sensitive information during transmission, it becomes necessary to ensure data security. In general, the IoT has an architecture consisting of the following layers [21]: the receiver (perception) layer, the network layer, and the

application layer. Since the processes performed at different levels of the IoT architecture differ, security issues also differ by level. Security issues in the IoT

concept require a different approach at each of these levels. Thus, in Fig. 1, the security issues in the IoT architecture are described as follows:

Table 1 – IoT Architecture

IoT architecture in layers	Levels Characteristics
Program layer	Integrated layer with existing hardware (RFID, sensors, actuators, etc.) to acquire physical environment data
Network layer	The layer that ensures the interaction of sensors and receiving devices with each other and the transmission of data over the network via a wired or wireless network.
Receiver layer	Interface layer (SCADA, DCS, etc.), which provides methods of interaction with the user and other programs.

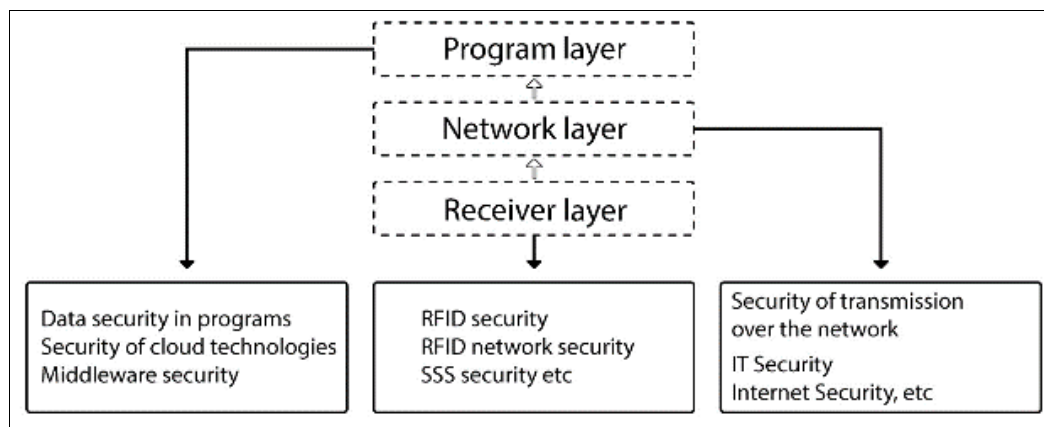


Fig. 1. Security issues at the layers of IoT architecture

A. Program layer. The program layer is the lowest layer in the IoT architecture. Typically, the memory and processing capacities of sensors/receivers are not at an adequate level.

Security issues at this level include ensuring the physical security of sensor devices and the security of data collection. Security systems are difficult to install here, and sensor data must be protected in terms of completeness, availability, and confidentiality. Additionally, attacks from the external network environment, such as DoS attacks, pose new security challenges. RFID includes security issues such as information leakage, replication attacks, data tracking, counterfeiting, cloning attacks, and man-in-the-middle attacks [21].

B. Network layer. The implementation of existing communication security mechanisms at this layer is complex and difficult. Verification of the authenticity of the data provided by the user (subject) - authentication and identification of the subject by unique information previously recorded in the system - identification is one of the methods of preventing unauthorized access. It is the basis of a security mechanism where confidentiality and integrity are equally important. In addition, distributed denial of service attacks is a common attack method in the network, especially in the Internet of Things, as this attack method is more relevant, an approach should be developed to solve against distributed denial of service attacks.

C. Receiver layer. The receiver layer is the highest layer in the IoT architecture and imposes different security requirements for different application environments.

In general, security concerns at the receiver level include tracking and external intrusions. In addition to being responsible for processes such as transmission control and traffic management, this layer also includes responsibilities for securing the applications used to collect data by sending requests, converting data into an understandable, relevant form.

For example, data sharing at the receiver layer can create issues such as data privacy, access control, and disclosure.

The completeness and reliability of sensor data is becoming a major research area [21]. Another key issue in sensors is to ensure objectivity, which is one of the main challenges. It is necessary to apply mechanisms to protect the privacy of people and objects in the physical environment. People are often unaware of the sensors/receivers around them. For this reason, it is necessary to adopt rules to protect human rights

Conclusions

The oil and gas industry is one of the industries most exposed to cyberattacks, with serious potential economic and national security implications.

Therefore, cybersecurity is an extremely important issue for the oil and gas industry, and cybersecurity

measures must keep pace with the speed of digitalisation of oil and gas operations.

Different sectors of the oil and gas industry naturally have different levels of risk and require different cybersecurity strategies. It is necessary to address the cybersecurity of mines, oil and gas transportation and processing, environmental processes,

and the entire range of activities in the industry. On the other hand, it is necessary to adopt laws and regulations related to the physical environment in the environment that surrounds us.

Therefore, there is a need to overcome the contradictions and improve the security of the IoT concept as a relevant and new field of research.

REFERENCES

1. R.M. Alquliyev, Y.N. İmamverdiyev, "Neft-qaz sənayesi üçün konseptual Big Data arxitekturası," İnfomasiya texnologiyaları problemləri, №1, s.3–14, 2017.
2. R.M. Alquliyev, Y.N. İmamverdiyev, "Neft-qaz sənayesi üçün Big Data strategiyası: Ümumi istiqamətlər," İnfomasiya texnologiyaları problemləri, №2, s. 34–47, 2017.
3. F. Shaik, A. Abdullah, & S. Klein, Digital transformation in oil & gas - Cyber security and approach to safeguard your business. World Petroleum Congress. 2017.
4. B. Clayton, & A. Segal, Addressing cyber threats to oil and gas suppliers. Council on Foreign Relations, 2013.
5. Top 10 cybersecurity vulnerabilities for oil and gas // Pipeline & Gas Journal, vol. 243(2), February 2016.
6. P. A. Ralston, J. H. Graham, & J. L. Hieb, "Cyber security risk assessment for SCADA and DCS networks," ISA transactions, vol. 46(4), pp. 583-594, 2007
7. M.A. Nasir, S. Sultan, S.Nefti-Meziani, & U. Manzoor, "Potential cyber-attacks against global oil supply chain," IEEE International Conference on Cyber Situational Awareness, Data Analytics and Assessment (CyberSA), pp. 1-7, 2015.
8. E.J.Byres, "Cyber security and the pipeline control system," Pipeline & Gas Journal, pp.58-59, 2009.
9. C. Bronk, & E. Tik-Ringas, "The cyber attack on Saudi Aramco," Survival, vol. 55(2), pp. 81-96, 2013.
10. İmamverdiyev Y.N. Big Data texnologiyalarının böyük perspektivləri və problemləri // İnfomasiya cəmiyyəti problemləri, 2016, №1, s.23–34.
11. Alquliyev R.M., İmamverdiyev Y.N., Abdullayeva F.C. Neft-qaz sənayesi üçün Big Data analitikanın cloud computing platformasında analytics-as-a-service kimi reallaşdırılması imkanlarının tədqiqi // İnfomasiya texnologiyaları problemləri, 2016, №1, s.11–26.
12. Sangvai P. Impact of Big Data in oil and gas industry // Proc. of the 10th Biennial International Conference & Exposition, 2013, pp.439–440.
13. Saha B., Shah H., Seth S., Vijayaraghavan G., Murthy A., Curino C. Apache Tez: a unifying framework for modeling and building data processing applications // Proc. of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, 2015, pp.1357–1369
14. Eissa H. Unleashing Industry 4.0 opportunities: Big data analytics in the midstream oil & gas sector / International Petroleum Technology Conference, 2020, 9 p. DOI: 10.2523/IPTC-19802-Abstract
15. İmamverdiyev Y. N. A conceptual model of digital twin for the oil and gas industry // Problems of Information Technology, 2020, No. 2, pp. 41-51.
16. Sennaar K. Artificial Intelligence in oil and gas – Comparing the applications of 5 oil giants. February 18, 2019. <https://emerj.com/ai-sector-overviews/artificial-intelligence-in-oil-and-gas/>
17. Abdullayeva F.D., İmamverdiyev Y.N. Development of oil production forecasting method based on Deep Learning // Statistics, Optimization and Information Computing, 2019, Vol. 7, pp. 826–839.
18. Fataliyev T., Mehdiyev S. Industry 4.0: The oil and gas sector security and personal data protection // International Journal of Engineering and Manufacturing, 2020, 10(2), pp. 1-14.
19. Temizel C., Canbaz C.H., Palabiyik Y., Putra D., Asena A., Ranjith R., Jongkittinarukorn K. A comprehensive review of smart/intelligent oilfield technologies and applications in the oil and gas industry / SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 2019, 22 p. DOI: 10.2118/195095-MS.
20. Abdullayeva F.J. Multidisciplinary study of the problems of Big Data technologies in the oil and gas industry/ Alquliyev R.M //International Journal of Oil, Gas and Coal Technology № 9 ,2018
21. A.V.Vijayalakshmi , Dr. L. Arockiam, "A Study on security issues and challenges In IoT", International Journal of Engineering Sciences & Management Research, 2016, vol.3, no.11, pp.34-43

Received (Надійшла) 15.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.11.2024

Проблеми кібербезпеки в нафтогазовій галузі

Мурад Омаров, Вюсаля Мурадова

Анотація. Внаслідок широкого застосування цифрових та інтернет-технологій у всіх процесах виробничого циклу нафтогазової промисловості кібербезпека стає все більшою загрозою. Тому сьогодні кібербезпека стає одним із пріоритетів технологічного розвитку нафтогазових компаній. У статті подано короткий опис цифрових трансформацій, що відбуваються в нафтогазовій галузі, аналізуються основні нові загрози кібербезпеці та надається інформація про інциденти кібербезпеки. Розглядається питання щодо розробки нових технологій на основі глибокого навчання для інтелектуальних нафтових родовищ.

Ключові слова: нафтогазова промисловість; цифровий майнінг; ОТ; IoT; кібербезпека.

Serhij Osadchy

Ukrainian State Flight Academy, Kropyvnytskyi, Ukraine

SMART PACKAGING OF PHARMACEUTICAL PRODUCTS

Abstract. Smart packaging of pharmaceutical products covers modern technologies that are transforming packaging approaches in the pharmaceutical industry. The study demonstrates how the use of intelligent systems, such as temperature and humidity sensors, RFID tags, and time indicators, improves control over the storage and transportation of products. In particular, smart packaging not only ensures the safety and quality of medicines, but also meets modern market requirements for transparency and regulatory compliance. The importance of smart technologies in packaging is growing due to the needs of consumers, who demand reliability and additional information about products. Thus, investments in smart packaging are becoming essential to maintain competitiveness in the global market.

Keywords: smart packaging, pharmaceutical products, packaging technologies, RFID, monitoring storage conditions, intelligent systems, quality control, transparency, regulatory requirements, technology investments.

Introduction

In the modern pharmaceutical industry, smart packaging plays a key role in ensuring the quality, safety and traceability of medicines at all stages of their life cycle - from production to delivery to the end consumer. Today, the development of the Industry 4.0 concept, characterized by the integration of smart technologies and automation of production processes, poses new challenges for pharmaceutical companies in terms of implementing innovative solutions for monitoring and controlling product quality. Smart packaging, which includes temperature, humidity and other sensors, allows for continuous monitoring of storage conditions, instant detection of violations and prevention of possible negative consequences for patients. Given the high requirements for drug safety and the growing importance of product traceability, the use of smart packaging technologies is becoming an integral part of sustainable and safe production. The implementation of such solutions helps pharmaceutical products meet international quality standards and allows companies to adapt to the new realities of Industry 4.0, where digitalization, quick access to data and its analysis for making informed management decisions are of particular importance.

The purpose of the article is to study and substantiate the feasibility of introducing smart packaging technologies for pharmaceutical products in terms of improving the quality, safety and efficiency of managing the storage and transportation of medicines. The study aims to identify the key advantages and challenges associated with the use of smart packaging equipped with temperature, humidity and other parameters, as well as to determine their role in the current conditions caused by the concept of the Industry. The results of the study should help to understand the need to integrate innovative solutions into the pharmaceutical packaging industry to ensure high product quality standards and compliance with international norms and standards in the supply chain.

Main part

The trend of smart packaging in the pharmaceutical industry, which includes temperature and humidity indicators, is an important area for ensuring the quality and safety of medicines at all stages of their life cycle - from production to delivery to the consumer. Smart packaging is

designed to solve the problem of monitoring storage and transportation conditions, as many medicines are sensitive to changes in temperature and humidity.

The development of smart packaging for pharmaceuticals is based on international standards that define the requirements for quality, safety and control over storage conditions. The main standards governing this area are: ISO 15378 is a standard for primary packaging of medicines that covers requirements for materials, production, and quality control. It applies the principles of GMP (Good Manufacturing Practice) and describes the requirements for the packaging of sensitive pharmaceutical products [1]; ISO 13485 is a standard for quality management systems in the production of medical devices, which also covers technologies for controlling the storage and transportation of pharmaceuticals [2]; USP 1079 - a standard developed in the United States, it contains recommendations for optimal storage conditions, protection against temperature fluctuations, humidity and other factors that may affect medicines [3]; GDP (Good Distribution Practice) is a European Union standard that defines the rules for ensuring the quality of pharmaceutical products during their transportation and storage. GDP contains requirements for smart packaging that controls environmental conditions.

Smart packaging requires the use of special electronic devices that allow you to monitor storage conditions and send information in real time:

1. Temperature and humidity indicators are small sensors that can continuously or periodically measure the temperature and humidity levels inside the package. These sensors often have the function of automatically recording data. They can be disposable or reusable, depending on the type of drug and the needs of the company" [4].

2. RFID (Radio Frequency Identification) is a technology that allows for wireless tracking of goods. RFID chips can be integrated into packaging and contain temperature and humidity data that is updated when conditions change. This technology allows you to automate the monitoring process and read data using an RFID reader at different stages of transportation [5].

3. NFC (Near Field Communication) - allows you to get information about storage conditions using a smartphone or other NFC-enabled device. This ensures that data on the condition of the drug is available even to the end user, which can be of particular value for temperature-sensitive drugs [6].

4. Bluetooth Low Energy (BLE) - modules that allow the transmission of data on storage conditions over a short distance. BLE sensors can be configured to transmit data to mobile devices or the cloud, providing access to real-time storage data.

Single-use sensors - some packaging includes disposable indicators that change color when a certain temperature or humidity is reached, indicating a possible deterioration in product quality. This simple solution is cost-effective and easy to use, although it does not provide full real-time monitoring" [7].

A general view of the above sensors is shown in Fig. 1 and Table 1 shows a comparison of their technical characteristics.

The conclusions on the use of Sensirion SHT35-DIS-B and Maxim Integrated DS1923 iButton in smart packaging of pharmaceutical products show that both sensors have their advantages depending on specific requirements. The SHT35-DIS-B provides high accuracy and continuous real-time monitoring of temperature and humidity, which is suitable for products that require

constant monitoring of storage conditions. However, it requires an external power supply and direct connection to the monitoring system. The DS1923 iButton, on the other hand, is convenient for tracking historical data due to its built-in memory and autonomous power supply, making it ideal for long-term monitoring during transportation. Thus, the choice between these devices depends on the need for continuous or intermittent monitoring and the storage conditions of the product.

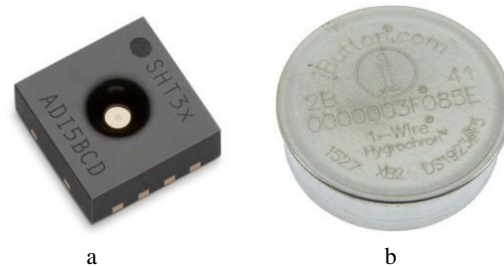


Fig. 1. Common temperature and humidity sensors used for smart packaging of pharmaceutical products: a – SHT35-DIS-B sensor [8]; b – Maxim Integrated DS1923 iButton logger [9]

Table 1 – Comparison of technical characteristics of SHT35-DIS-B sensor and Maxim Integrated DS1923 iButton logger

Characteristics	Sensirion SHT35-DIS-B [8]	MaximIntegratedDS1923 iButton [9]
Type	Digital sensor of temperature and humidity	Temperature and humidity logger
Temperature accuracy	$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (0to 60°C)	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (0to 70°C)
Humidity accuracy	$\pm 1.5\%$ RH (20% to 80% RH, at 25°C)	$\pm 5\%$ RH (10% to 90%RH)
Temperature measurement range	-40°C to $+125^{\circ}\text{C}$	-20°C to $+85^{\circ}\text{C}$
Memory	Absent (transmits data in real time time)	8192, temperature and humidity records
Power consumption	Low	Works autonomously for a long time
Appointment	Continuous monitoring of conditions	Data logging for tracking purposes storage conditions
Form factor	Compact sensor	Compact in iButton format

Let's analyze disposable sensors that can be used for smart packaging of pharmaceutical products, providing temperature and humidity control during transportation in smart packaging of pharmaceutical products. Disposable sensors for smart pharmaceutical packaging usually have limited functionality and are used for one-time monitoring of temperature or humidity during transportation or storage. They do not store detailed data, but only indicate when thresholds are exceeded, often through a color change or other simple visual signal. Their specialty is that they are cost-effective, do not require batteries, and can be easily

integrated into packaging. In contrast, reusable sensors for smart packaging are often equipped with more sophisticated electronics, can store data for long-term monitoring, and have the ability to transmit data in real time. Such sensors are used for continuous monitoring and analysis, which allows for detailed tracking of storage conditions and optimization of logistics processes for pharmaceutical products. A general view of disposable sensors that can be used for smart packaging of pharmaceutical products is shown in Fig. 2, and their technical characteristics are shown in Table 2.

Table 2 – Comparison of technical characteristics of Temptime LIMITMarker and 3M MonitorMark

Characteristics	TemptimeLIMITMarker [10]	3M MonitorMark[11]
Type	Disposable temperature indicator	
Temperature accuracy	Triggered at specified temperature thresholds	
Temperature measurement range	Depends on the model (thresholds from 0°C to $+38^{\circ}\text{C}$)	
Data recording	Visual color change indicator	
Energy consumption	Does not require batteries	
Features	Instant detection of temperature regime violations	Easy to use, ideal for monitoring during transportation
Application	Control of the "cold chain"	Temperature control in pharmaceutical packaging

The analysis of the technical parameters of Temptime LIMITMarker and 3M MonitorMark shows their high efficiency in one-time monitoring of the temperature of pharmaceutical products. Both indicators do not require batteries, making them easy to use and

cost-effective. The Temptime LIMITMarker offers flexibility in setting temperature thresholds, allowing it to be adapted to different storage conditions, while the 3M MonitorMark provides reliable control with fixed temperatures, which can be useful for standard products.



Fig. 2. General view of single-use sensors that can be used for smart packaging of pharmaceutical products: a – Temptime LIMITMarker [10]; b – 3M MonitorMark [11]

The visual color change indicator in both models allows for instant detection of temperature abnormalities, which is critical to ensuring the quality and safety of pharmaceutical products. Due to their compact size, both sensors can be easily integrated into the packaging, making them ideal for monitoring the cold chain during transportation. Thus, the choice between these two indicators depends on the specific requirements for temperature control and flexibility in use. Obtaining data from disposable sensors for smart pharmaceutical packaging involves several steps that ensure monitoring of storage and transportation conditions. The main components of this structure include:

- the sensor part, disposable sensors such as Temptime LIMITMarker or 3M MonitorMark, equipped with sensors that respond to changes in temperature or humidity. The sensors constantly monitor the surrounding conditions, detecting violations of the set temperature thresholds; visual indicator, when conditions exceed the set values, the sensors activate a visual indicator, usually in the form of a color change. This indicator allows you to instantly detect whether the product has been exposed to unfavorable conditions, which is critical for pharmaceutical products;

- data storage, as a rule, does not store data on temperature conditions, as their purpose is to provide instant information about violations. Once the indicator is activated, the violation data cannot be saved or analyzed further;

- packaging integration, the sensors are designed to be easily integrated into the packaging of goods, which allows them to be used directly during transportation. This makes them effective for monitoring the “cold chain” during the transportation of temperature-sensitive pharmaceutical products.

- testing and verification, after receiving the results from the sensor, manufacturers or logistics companies can conduct verification by analyzing whether the color change of the indicator is really an indication of a violation of conditions;

- interaction with logistics systems, although disposable sensors do not transmit data in real time, they can be used in conjunction with other monitoring systems that automatically record the temperature conditions in containers during transportation. Such systems can be integrated into larger logistics platforms to provide comprehensive control.

Smart packaging in the pharmaceutical industry offers numerous benefits that significantly improve product management and safety. Firstly, the technologies used in smart packaging allow for continuous monitoring of storage conditions such as temperature and humidity, which is critical to maintaining the quality of pharmaceuticals. This significantly reduces the risk of loss of efficacy or product

safety due to improper transportation conditions. In addition, smart packaging makes it possible to track the history of goods movement in real time, which contributes to increased transparency in the supply chain. An important aspect is also the ability to detect counterfeits, as modern technologies such as QR codes and RFID make it easy to verify the authenticity of goods. However, the use of smart packaging also has some disadvantages. The cost of implementing such technologies can be significant, making them less affordable for small businesses. There is also a need for staff training, which may require additional time and resources. In addition, the technologies may face compatibility issues with existing management systems. Despite these challenges, smart packaging remains an important step in the development of the pharmaceutical industry, as its advantages far outweigh its disadvantages, ensuring a high level of product control and safety.

The prospects for the use of sensors in smart packaging in the pharmaceutical industry look promising as the technology continues to evolve and improve. First of all, the integration of the latest sensor technologies, such as IoT (Internet of Things), can ensure continuous monitoring of storage and transportation conditions. This will reduce the risk of product spoilage and improve product quality. In addition, new sensors with self-learning capabilities will be able to adapt to different conditions, making them even more versatile and efficient. Advances in microelectronics will make it possible to create smaller and cheaper sensors, which will facilitate their widespread use even in small businesses. Connectivity to cloud platforms will enable in-depth analysis of sensor data, helping to identify trends and optimize processes. Users will also be able to receive real-time notifications of any deviations, which will facilitate timely response. At the same time, the introduction of blockchain technologies will provide an additional level of security and transparency, allowing for easy tracking of product history. Expanding the functions of sensors, such as measuring not only temperature but also other parameters such as oxygen or pH, will open up new horizons for quality control. Thus, the use of sensors in smart packaging is becoming not only a necessity, but also an opportunity to significantly improve efficiency and safety in the pharmaceutical industry. In the course of the study and analysis of scientific publications, the percentage of use of sensors, loggers and disposable sensors for smart packaging of pharmaceutical products was determined. The results obtained are shown in the graph in Fig. 3.

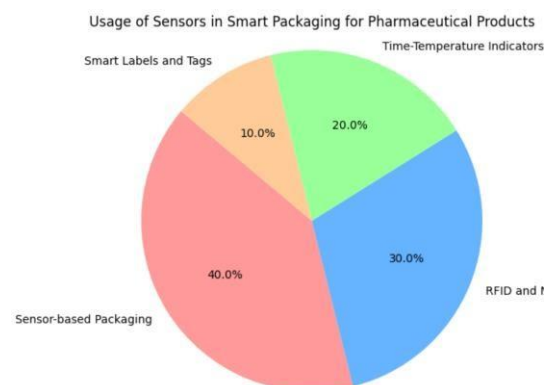


Fig. 3. Graph of the use of sensors, loggers and disposable sensors for smart packaging of pharmaceutical products

The pie chart below illustrates the distribution of sensor usage in smart pharmaceutical packaging, emphasizing the important role that each type of sensor plays in ensuring product safety and quality. Sensors based on touch technologies are the most common technology, accounting for 40% of the total usage, indicating the critical need to monitor environmental conditions such as temperature and humidity, which are vital to maintaining the effectiveness of pharmaceutical products. RFID and NFC technologies are next in importance, accounting for 30% of the total, demonstrating their importance in improving traceability and supply chain management by providing detailed product information and tracking capabilities throughout the distribution process. Time and temperature indicators account for 20% of the total, showing their function in alerting users to any temperature irregularities that could threaten product integrity. Finally, smart labels and tags, while making up the smallest portion at 10%, still play a valuable role by providing additional product information and improving the consumer experience. The trend towards increased adoption of smart packaging technologies is in line with the growing demand for improved product safety, regulatory compliance and consumer transparency in the pharmaceutical sector. This emphasis on integrating advanced technologies into packaging not only improves operational efficiency, but also supports sustainability efforts by potentially reducing waste and ensuring that products are stored and transported in optimal conditions.

Conclusions

During the study, it was found that smart packaging of pharmaceutical products has a significant impact on ensuring the quality and safety of goods. The integration of modern technologies, such as temperature and humidity sensors, RFID tags, as well as time and temperature indicators, allows not only to control the storage conditions of products but also to reduce the risk of product spoilage. This is especially important in the pharmaceutical sector, where compliance with product safety and quality standards is critical. Studies show that the introduction of smart packaging supports regulatory compliance, which significantly increases the responsibility of companies for the safety of their products. In addition, smart packaging provides convenience for consumers by providing access to additional information through smart labels, which contributes to better product awareness. Innovations in this area also help to reduce the negative impact on the environment by optimizing the use of resources. Thus, smart packaging not only meets modern market requirements, but also opens up new opportunities for the development of the pharmaceutical industry. It is important to note that investments in smart packaging technologies are becoming critically important for maintaining competitiveness in the growing global pharmaceutical market and improving the interaction between producers and consumers.

REFERENCES

1. Wang, C., Liu, L., & Wang, Z. (2023, October). Development and Application of Intelligent Packaging Design under the Background of Artificial Intelligence. In *2nd Int. Conf. on Intelligent Design and Innovative Technology*, pp. 308- 318.
2. Schulz, C., Kortmann, S., Piller, F. T., & Pollok, P. (2023). Growing with smart products: Why customization capabilities matter for manufacturing firms. *Journal of Product Innovation Management*, 40(6), 794-816.
3. Faisal, S., Samoth, D., Aslam, Y., Patel, H., Park, S., Baby, B., & Patel, T. (2023). Key Features of Smart Medication Adherence Products: Updated Scoping Review. *JMIR aging*, 6, e50990.
4. Fang, W., Li, Z., Gao, J., Meng, R., He, G., Hou, Z., ... & Ma, W. (2023). The joint and interaction effect of high temperature and humidity on mortality in China. *Environment International*, 171, 107669.
5. Liu, G., Wang, Q. A., Jiao, G., Dang, P., Nie, G., Liu, Z., & Sun, J. (2023). Review of wireless RFID strain sensing technology in structural health monitoring. *Sensors*, 23(15), 6925.
6. Lazaro, A., Villarino, R., Lazaro, M., Canellas, N., Prieto-Simon, B., & Girbau, D. (2023). Recent advances in batteryless NFC sensors for chemical sensing and biosensing. *Biosensors*, 13(8), 775.
7. Natgunanathan, I., Fernando, N., Loke, S. W., & Weerasuriya, C. (2023). Bluetooth low energy mesh: Applications, considerations and current state-of-the-art. *Sensors*, 23(4), 1826.
8. SHT35-DIS-B-Digital humidity. URL: <https://sensirion.com/products/catalog/SHT35-DIS-B>
9. DS1923 iButton Hygrochron Temperature. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS1923.pdf>
10. LIMITmarker® Increases Prescriber Confidence. URL: <https://rxinsider.com/market-buzz/?p=1065-limitmarker-reg-increases-prescriber-confidence-and-customer-satisfaction>
11. 3M Індикатори теплового впливу. URL: https://www.3m.com.ua/3M/uk_UA/p/c/tovari-dlia-laboratorii-i-tiestuvannia/indikatori-tieplovoogo-vplivu/i/biezpieka/biezpieka-kharchovikh-produktiv/

Received (Надійшла) 25.08.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.10.2024

Smart пакування фармацевтичної продукції

С. І. Осадчий

Анотація. Smart пакування фармацевтичної продукції охоплює сучасні технології, які трансформують підходи до упакування в фармацевтичній індустрії. Дослідження демонструє, як використання інтелектуальних систем, таких як датчики температури та вологості, RFID-мітки та індикатори часу, покращує контроль за умовами зберігання та транспортування продукції. Зокрема, smart пакування забезпечує не лише безпеку та якість лікарських засобів, але й відповідає сучасним вимогам ринку щодо прозорості та відповідності регуляторним нормам. Важливість smart технологій у пакуванні зростає у зв'язку з потребами споживачів, що вимагають надійності та додаткової інформації про продукцію. Таким чином, інвестиції в smart пакування стають необхідними для підтримки конкурентоспроможності на глобальному ринку.

Ключові слова: smart пакування, фармацевтична продукція, технології упакування, RFID, моніторинг умов зберігання, інтелектуальні системи, контроль якості, прозорість, регуляторні вимоги, інвестиції в технології.

С. І. Попов, О. О. Орехов

Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

МЕТОДИ І ПРОГРАМНО-АПАРАТНІ ЗАСОБИ ОБРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ НА БАЗІ РОЇВ БПЛА

Анотація. Досліджено методи штучного інтелекту для систем моніторингу лісових пожеж на базі роїв БПЛА. Розглянуто методи, що застосовуються як для окремих БПЛА, так і для різних архітектур, що використовують рій БПЛА. Показано, що інтеграція ШІ розширює можливості БПЛА щодо раннього виявлення пожежі, моніторингу в реальному часі та прийняття рішень. Дослідження показало, що хоча інформація, зібрана окремими БПЛА, є цінною, існують обмеження, які можна виключити, використовуючи рій БПЛА, у якому підсилюються інтелектуальні обчислювальні можливості. Доведено, що різні архітектури – централізована, розподілена та гібридна – надають унікальні переваги в різних сценаріях моніторингу пожеж. Дослідження підкреслило важливість вибору раціональної архітектури виходячи з конкретних завдань моніторингу. Кожна архітектура має певні обмеження, але запропоновані рішення відзначаються покращенням ефективності, надійності та масштабованості. Остаточна конфігурація складатиметься з комбінації БПЛА та засобів ШІ, розроблених для максимального підвищення ефективності моніторингу пожежі. Розвиток потенціалу роєвого інтелекту, прогностичної аналітики та адаптивного розподілу завдань визначено як важливий напрям для майбутніх досліджень. Зазначено, що ці результати важливі для розроблення нових систем управління для моніторингу, запобігання, обмеження та визначення наслідків лісових пожеж на базі роїв БПЛА.

Ключові слова: лісові пожежі, моніторинг, інтелектуальні системи, безпілотні літальні апарати, рій БПЛА, гібридні архітектури, штучний інтелект.

Вступ

Мотивація. Лісові пожежі становлять значну небезпеку для екосистем, життя людей і власності. Тому існує потреба в стратегіях моніторингу та раннього виявлення. Зростання кількості та інтенсивності пожеж внаслідок зміни клімату [1] призвело до того, що традиційні методи моніторингу стали менш ефективними. Дослідження ефективності систем боротьби вказують на те, що інвестиції у них для раннього виявлення пожеж в десятки, а іноді і в сотні разів менші, ніж потенційні збитки [2].

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) надають великі перспективи щодо надання даних у режимі реального часу, їхнього опрацювання та швидкого реагування. Тим не менш, хоча окремі БПЛА покращують виявлення пожежі та моніторинг, будь-який одиничний БПЛА обмежений відносно невеликою зоною покриття в певний момент часу, а обсяг даних, що можуть бути оброблені на борту, обмежений.

Штучний інтелект (ШІ) вирішує такі проблеми, використовуючи вдосконалену аналітику даних і процеси прийняття рішень [3], та більшість літератури базується на окремих БПЛА. Тенденція до використання рою БПЛА відкриває цілий ряд нових можливостей і викликів; зокрема ті, що стосуються ефективної координації та комунікації дронів.

Дослідження і впровадження різних архітектур взаємодії – централізованої, розподіленої чи гібридної – оптимізує системи з роєм БПЛА, оскільки кожна з них є кращою для різного сценарію.

У даній оглядовій статті пропонується дослідити ці архітектури із врахуванням впровадження ШІ, щоб визначити найкращі конфігурації для моніторингу лісових пожеж, мінімізувавши існуючі обмеження.

Мета. Основна мета цієї роботи полягає в дослідженні застосування штучного інтелекту в системах моніторингу лісових пожеж на базі БПЛА, враховуючи

чи рішення як для окремих, так і для рою БПЛА. Рішення для окремих БПЛА будуть детально проаналізовані з окресленням їхніх переваг та недоліків. Також буде оцінено потенціал систем із роєм БПЛА шляхом дослідження різних архітектур взаємодії та можливістю застосування різних методів штучного інтелекту, щоб визначити найбільш перспективні підходи для вдосконалення моніторингу пожеж. Кінцевою метою буде оптимізація існуючої або розробка нової оптимальної архітектури, яка забезпечує виявлення лісових пожеж і реагування на них з найвищим рівнем ефективності та результативності.

Огляд джерел. За результатами огляду ключових джерел їх можна класифікувати у такий спосіб:

- джерела з оглядом актуальності теми дослідження, де висвітлено зростання проблеми зі зміною клімату [1], ефективність інвестицій у даний напрям [2], поширені методи, що застосовуються для подолання проблеми та сучасні перспективні напрями [3];

- статті, що розглядають застосування штучного інтелекту для окремих БПЛА. Це напрями, пов'язані з виявленням та розпізнаванням об'єктів [4, 6], аномалій [7, 8], планування маршруту [9, 10], аналізу термографії [11] та об'єднання даних з різних датчиків [12];

- статті, що присвячені застосуванню штучного інтелекту для рою БПЛА. Такими методами є спільне картографування пожеж [13, 14], децентралізоване прийняття рішень [15, 16], адаптивного розподілу завдань [17], роєвий інтелект [18, 19], прогностична аналітика поширення пожежі [20, 21] та кооперативне спостереження [22];

- статті, що досліджують архітектури взаємодії БПЛА та можливості застосування штучного інтелекту. Такими є централізована різних типів [23, 24], розподілена [25], ієрархічна [26], гібридна [27] та інші з аналізом і виділенням найбільш ефективних серед них [28, 29].

Інтелектуальні методи оброблення інформації в системах моніторингу лісових пожеж для окремих БПЛА

Штучний інтелект, інтегрований у БПЛА, багаторазово збільшив потенціал цих транспортних засобів, особливо в моніторингу лісових пожеж. Штучний інтелект тепер дозволяє БПЛА виконувати завдання, пов'язані з автономним виявленням об'єктів, виявленням аномалій, плануванням шляху, термографією та об'єднанням даних у реальному часі. Нижче наведено огляд різних рішень штучного інтелекту, що стосуються цих проблем, і показано їхні методи, переваги, недоліки та обмеження, пом'якшені розгортанням роїв БПЛА.

Технології ШІ наділяють БПЛА здатністю приймати рішення та обробляти дані в автономному режимі. Поширеними методами є алгоритми машинного навчання, методи глибинного навчання та нейронні мережі, які дозволяють БПЛА розпізнавати, класифікувати та реагувати на різні сигнали в середовищі. Та ефективність таких рішень штучного інтелекту в більшості випадків обмежена обчислювальною потужністю БПЛА, його датчиками та зоною покриття. Нижче буде розглянуто застосування штучного інтелекту, які використовують окремі БПЛА, а також їхні відповідні переваги та обмеження.

Виявлення та розпізнавання об'єктів дуже важливі для виявлення спалахів вогню, диму та інших відповідних об'єктів у лісовому середовищі. Поширеними методами штучного інтелекту, які використовуються, є згорткові нейронні мережі (CNN) [4], як-от алгоритм You Look Only Once (YOLO) [5] і регіональні CNN (R-CNN) [6]. Вони навчаються на великих наборах даних, щоб розпізнавати певні шаблони та об'єкти на аерофотознімках. Метод має високу точність виявлення конкретних об'єктів, таких як дим і вогонь, високу швидкість обробки, особливо в оптимізованій моделі, як YOLOv8 та можливість працювати в режимі реального часу – миттєвий зворотний зв'язок. У той же час його продуктивність може погіршитися в складних середовищах із бар'єрами, наприклад, у густих лісах, задля високої точності метод може вимагати великої кількості обчислювальних ресурсів для обробки в реальному часі, і, звісно, проблемою є складність роботи з дрібними предметами через висоту роботи БПЛА, що може знизити роздільну здатність зображення. Рій БПЛА може розгортатися для покращення виявлення об'єктів за допомогою спільного зондування, коли БПЛА захоплюють різні кути чи області, зменшуючи оклюзію та покращуючи виявлення менших об'єктів.

Метод виявлення аномалій використовується для фіксування незвичайних моделей або дій, які можуть призвести до пожежі. Методи штучного інтелекту включають однорангові SVM [7], автокодувальники та моделі глибинного навчання, такі як мережі довгострокової пам'яті (LSTM) [8], що здатні досліджувати зміну даних для виявлення аномалій. Перевагами даного методу є ефективність у розпізнаванні рідкісних подій, які не відповідають регулярним трендам, можливість навчання на історичних даних, щоб з часом

підвищити точність та здатність працювати самостійно, зменшуючи залежність від втручання людини. Головними недоліками є високий відсоток хибнопозитивних спрацьовувань через високу мінливість навколишнього середовища, наприклад, зміни температури, складність відрізнити справжні аномалії, такі як вогонь, від інших доброякісних змін, таких як відбиття сонячного світла, потреба у великих наборах даних для навчання. Розгорнутий рій БПЛА перехресно перевіряє аномалії, виявлені різними БПЛА, тим самим зменшуючи помилкові спрацьовування та підвищуючи надійність виявлення.

Планування маршруту та навігація важливі для ефективного охоплення великих територій і досягнення певних місць, наприклад, спалахів пожеж. Застосовуваними методами є поєднання класичних A* алгоритму, алгоритму Дійкстри [9] з тими, що використовують штучний інтелект, такими як навчання з підкріпленням (RL) і генетичні алгоритми (GA) [10], які дозволяють БПЛА динамічно коригувати траєкторію. Ефективне покриття великих площ з мінімальними енерговитратами; здатність адаптуватися до мінливого навколишнього середовища, наприклад вітру, у режимі реального часу є головними завданнями методу. Автономна робота забезпечує менший контроль з боку людини. Проблеми виникають у складних середовищах з перешкодами (наприклад, високими деревами), ускладнюючи планування шляху. Метод вимагає значної обчислювальної потужності, особливо для коригування в реальному часі. Обмежується терміном служби батареї БПЛА, що обмежує тривалість і відстань місій. Використання рою БПЛА дозволяє скоординовано планувати маршрут, де БПЛА можуть розділяти зону моніторингу між собою, забезпечуючи більш повне покриття та скорочуючи час, необхідний для реагування на спалах пожежі.

Термографія має вирішальне значення для виявлення теплових сигнатур, які інакше не були б видимі людським оком, що вказує на те, що сталася пожежа. Методи штучного інтелекту, які використовуються в цьому контексті, охоплюють методи обробки зображень у поєднанні з моделями глибокого навчання, такими як CNN і алгоритми виявлення теплових аномалій [11]. Метод дозволяє виявляти пожежу в умовах недостатньої видимості, наприклад у темряві або через дим. Він також може класифікувати вогонь та інші джерела тепла за допомогою отриманих теплових профілів. Це покращує здатність моніторингу пожежі в режимі реального часу з швидким реагуванням. У той же час теплові камери часто дорогі та можуть бути важкими, що обмежує їх використання на менших БПЛА. Фактори навколишнього середовища, наприклад погода чи густе листя, можуть впливати на точність. Термографічні зображення високої роздільної здатності потребують обладнання зі значним об'ємом пам'яті для зберігання та обробки даних. Використання рою БПЛА дозволяє об'єднувати теплові дані з кількох БПЛА, щоб створити дуже детальну й точну теплову карту контрольованої території, таким чином підвищуючи здатність виявляти невеликі або добре приховані пожежі.

Об'єднання даних у режимі реального часу забезпечує повне уявлення про навколишнє середовище шляхом консолідації даних від численних датчиків, наприклад, візуальних, теплових, LiDAR, тощо. Для інтеграції даних у режимі реального часу використовуються традиційні методи, такі як фільтри Калмана і баєсовські мережі, поряд із тими, що використовують штучний інтелект, такими як моделі глибокого навчання з підкріпленням (DRL) [12]. Це підвищує точність виявлення пожежі, оскільки дає змогу використовувати інші доступні джерела даних. Метод забезпечує цілісне уявлення про контрольовану територію, забезпечуючи тим самим краще прийняття рішень. Це зменшує ризик помилкових тривог завдяки перехресним посиланням на кілька джерел

даних. Недоліками є інтенсивні обчислення, що вимагає вдосконалених високопродуктивних процесорів. Водночас, обробка та синхронізація даних з різних датчиків складна, тому можуть бути проблеми із затримкою для операцій у реальному часі через навантаження на обробку. У випадку використання рою БПЛА можна розділити процес об'єднання даних між кількома блоками, значно зменшуючи навантаження на обробку будь-якого окремого БПЛА та роблячи можливою швидшу та надійнішу інтеграцію даних.

Порівняння описаних методів за застосуванням, використовуваними методами, основними функціями, поточними обмеженнями, і тими з них, які можуть бути вирішені за рахунок використання рою БПЛА наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Методи, що використовуються в інтелектуальних системах для обробки даних з окремих БПЛА

№	Рішення	Застосування	Метод	Переваги	Недоліки	Покращення з використанням рою БПЛА
1	Виявлення та розпізнавання об'єктів	Виявлення вогню, диму	CNN, YOLO, R-CNN	Висока точність, швидкість обробки в реальному часі	Погіршення продуктивності у складних середовищах, високі обчислювальні вимоги, проблеми з дрібними предметами	Покращене виявлення за допомогою спільного зондування, зменшена оклюзія
2	Виявлення аномалій	Виявлення незвичайних подій і дій	Однорангові SVM, автокодувальники, мережі LSTM	Ефективний у розпізнаванні рідкісних подій, можливість покращення роботи навчання на історичних даних	Велика кількість хибних спрацьовувань, складність відрізнити справжні аномалії, потреба у великих наборах даних	Перехресна перевірка різними БПЛА зі зменшенням помилкових спрацьовувань та підвищенням надійності
3	Планування маршруту та навігація	Ефективне охоплення великих територій, досягнення осередків пожежі	A* алгоритми, Дійкстри, RL, GA	Ефективне покриття з мінімальними витратами, адаптація в режимі реального часу, автономність	Зростаюча складність роботи в складних середовищах	Скоординоване планування маршруту для кращого покриття території
4	Термографія з аналізом	Виявлення теплових сигналів	CNN, алгоритми виявлення теплових аномалій	Робота під час недостатньої видимості, наприклад, вночі чи через дим	Дороге обладнання, високі вимоги до нього	Покращене виявлення невеликих і прихованих пожеж завдяки створенню детальної теплової карти
5	Об'єднання даних у режимі реального часу	Більш повне уявлення про середовище	Фільтри Калмана, баєсовські мережі, глибоке навчання з підкріпленням DRL	Підвищена точність виявлення, цілісне уявлення про територію, зменшено ризик помилкових тривог	Зростання складності обробки даних, синхронізація даних датчиків, потенційна затримка	Об'єднання розподілених між підгрупами даних, швидша та надійніша інтеграція

Технології штучного інтелекту значно розширюють можливості окремих БПЛА у моніторингу лісових пожеж за рахунок автономного та ефективного виявлення, навігації та обробки даних. Однак такі системи також страждають від нестачі обчислювальної потужності, обмежень датчиків і зони покриття. Такі проблеми можна частково пом'якшити за допомогою розгорнутого рою БПЛА, які забезпечують більш надійне та масштабоване рішення для моніторингу лісових пожеж. Використання таких сильних сторін, як спільне зондування, скоординоване плану-

вання траєкторії та розподілене об'єднання даних з різних БПЛА, значно підвищить ефективність і надійність виявлення пожежі та реагування.

Інтелектуальні методи оброблення інформації в системах моніторингу лісових пожеж для рою БПЛА

Моніторинг лісових пожеж роєм БПЛА створює абсолютно нові аспекти ефективності та надійності. У той час як штучний інтелект наділяє окремі БПЛА розширеними можливостями, співпраця між

кількома БПЛА відкриває ширші перспективи та масштабніші операції. У цьому розділі розглядаються різні рішення штучного інтелекту, розроблені для рою БПЛА, в аспектах спільного картографування пожежі, децентралізованого прийняття рішень, адаптивного розподілу завдань, ройового інтелекту для стримування пожежі, прогнозованої аналітики поширення пожежі та спільного спостереження. Буде розглянуто переваги, недоліки та обмеження цих рішень і підкреслено, як можна використовувати рій БПЛА для вирішення певних проблем.

Штучний інтелект у ролі БПЛА дозволяє дронам самоорганізуватися, щоб спільно виконувати такі завдання, як виявлення вогнища, локалізація та моніторинг. Методи штучного інтелекту, що застосовуються до цих систем, включають алгоритми машинного навчання, нейронні мережі, навчання з підкріпленням, методи ройового інтелекту тощо. Ці методи дозволяють БПЛА обмінюватися інформацією та приймати децентралізовані рішення, динамічно розподіляючи завдання щодо поширення пожежі. Однак такі системи також додають складності, що створює нові проблеми з точки зору зв'язку, синхронізації та прийняття рішень у реальному часі.

Спільне картографування пожеж включає в себе БПЛА, які співпрацюють для створення повної карти зони пожежі. Для цього використовуються такі методи штучного інтелекту, як CNN з розподіленими нейронними мережами [14], а також графові згорткові нейронні мережі (GCN) [13]. Такі методи дозволяють БПЛА вільно та незалежно досліджувати великі території, обмінюючись даними один з одним у процедурах картографування. Це створює повну та детальну карту великих територій у режимі реального часу, покращує точність виявлення пожежі шляхом перехресного порівняння даних з кількох БПЛА та збільшує покриття шляхом зменшення сліпих зон завдяки спільному спостереженню. Головними недоліками методу є зв'язок і синхронізація даних між БПЛА. Інтенсивність обчислень також зростає, оскільки кожен БПЛА повинен обробляти дані та ділитися ними з іншими. Під час об'єднання даних можуть виникати затримки або помилки, тому остаточна карта може мати неточності.

Децентралізоване прийняття рішень дозволяє рою БПЛА працювати автономно без центрального блоку управління. Методи штучного інтелекту, які використовуються для того, щоб дозволити БПЛА приймати рішення на основі локальних даних і дій дронів, що знаходяться поблизу, включають багато-агентні системи навчання з підкріпленням (MARL) [15], федеративне навчання [16] та ройовий інтелект. Перевагами методу є менша залежність від центрального блоку управління, що підвищує стабільність системи; більш швидке прийняття рішень, оскільки БПЛА можуть реагувати на локальні зміни в режимі реального часу; покращення масштабованості, оскільки нові БПЛА можна додавати до системи без перевантаження центрального блоку. В той же час існує ризик того, що БПЛА можуть приймати непослідовні рішення, якщо вони не отримають достатньо інформації або неправильно інтерпрету-

ють дані локально. Стає все важче забезпечити роботу всіх БПЛА для єдиної задачі. Також можуть виникнути вузькі місця в комунікації, особливо у випадку великих роїв.

При методі адаптивного розподілу завдання розподіляються динамічно з урахуванням поточної ситуації та можливостей кожного дрона. Методи штучного інтелекту – глибинні Q-мережі (DQN) [17] при використанні з розподіленими нейронними мережами – застосовуються для оптимізації розподілу завдань у реальному часі. Цей підхід пропонує ряд переваг, оскільки підвищує ефективність роботи БПЛА завдяки виконанню завдань, покладених на найпотужніші безпілотники. Завдяки гнучкому розподілу завдань можна легко адаптувати мінливе середовище навіть для рою БПЛА. За умови зменшення індивідуального навантаження жоден БПЛА не використовується надмірно, і, отже, зношення зменшується. Недоліками методу є те, що навколишнє середовище постійно оцінюється та контролюється, що може бути досить вимогливим до обчислень, особливо у великих роях із складними вимогами до завдань. Якщо ж модель не навчена належним чином або середовище змінюється дуже швидко, це може призвести до неоптимального розподілу завдань.

Ройовий інтелект оптимізує поведінку БПЛА у рою під час моніторингу пожеж. Це досягається за допомогою методів штучного інтелекту, які оптимізують методи рою часток (PSO) [18] і мурашині алгоритми (ACO) [19], які полегшують спільну поведінку кількох БПЛА під час виконання завдань. Цей метод є універсальним, що дозволяє використовувати велику кількість БПЛА. У той же час він є гнучким: рій здатний адаптуватися до змін навколишнього середовища або втрати окремих його частин. Ефективність пожежогасіння також можна підвищити, оскільки можливі дії в кількох місцях одночасно. Складність реалізації полягає у складних алгоритмах взаємодії, високим вимоги до зв'язку та зв'язності, особливо у великих роях, що може призвести до затримок або помилок. Не виключається ризик непередбачуваної поведінки рою за відсутності належного централізованого управління або різких змін умов середовища.

Прогнозна аналітика використовує ШІ, щоб передбачити, як поширюватиметься пожежа, враховуючи поточні дані та умови навколишнього середовища. Методи глибинного навчання, рекурентних нейронних мереж (RNN) [20] і аналізу часових рядів засобами машинного навчання [21] застосовуються для прогнозування траєкторій пожежі, на основі яких можуть прийматися рішення. Отримана корисна інформація дає змогу прогнозувати ймовірний розвиток пожежі, що дозволяє використовувати стратегії активного реагування. Метод може включати різні джерела даних, включаючи прогнози погоди, карти рослинності та дані датчиків у реальному часі. Ефективність боротьби з пожежами підвищується шляхом прогнозування зон високого ризику та потенційних шляхів евакуації. Але процесу обчислення потрібен великий обсяг даних і обчи-

словальної потужності, особливо якщо це стосується складних чи швидкозмінних середовищ. Неправильні прогнози можуть виникнути, якщо модель не навчена належним чином або відбуваються великі зміни в умовах середовища. Крім того, результати передбачення можуть бути відкладені, якщо дані в реальному часі недоступні.

Кооперативне спостереження – це система безперервного спостереження великої території роєм БПЛА. Методи штучного інтелекту, такі як MARL, розподілені сенсорні мережі та федеративне навчання, використовуються разом, щоб забезпечити повне покриття [22]. Це дозволяє постійно контролювати великі території, отже, збільшується можливість

виявлення пожежі на ранніх стадіях. Метод підвищує точність спостереження, об'єднуючи дані з різних БПЛА, що зменшує ймовірність втрати цінних даних через прогалини в охопленні або збій датчиків. До зв'язку та координації пред'являються високі вимоги, особливо у великих роїв БПЛА. Для ефективного охоплення потрібні складні алгоритми, щоб відрізнити дублікати даних. Можливі затримки або помилки в обробці даних, особливо якщо БПЛА експлуатуються в складних умовах.

Порівняння описаних методів для застосування, використовуваними методами, основними перевагами та недоліками і тими з них, які не стосуються окремих БПЛА, наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Методи, що використовуються в інтелектуальних системах для обробки даних у рої БПЛА

№	Рішення	Застосування	Метод	Переваги	Недоліки	Основні обмеження, які не стосуються окремих БПЛА
1	Спільне картографування пожеж	Картографування великих територій, охоплених вогнем	Графові згортовані нейронні мережі (GCN), розподілені нейронні мережі	Комплексне відображення загальної картини пожежі в реальному часі, підвищена точність, покращене покриття	Високі вимоги до зв'язку та синхронізації даних між БПЛА, висока обчислювальна інтенсивність	Проблеми масштабованості у великомасштабних операціях.
2	Децентралізоване прийняття рішень	Автономна робота без центрального управління	Багатоагентне навчання з підкріпленням (MARL), федеративне навчання, ройовий інтелект	Підвищена стійкість через меншу залежність від центру, швидке прийняття рішень, покращена масштабованість	Ризик непослідовних рішень, підвищеної складності, вузьких місць у спілкуванні	Комплексна координація та синхронізація даних між кількома БПЛА.
3	Адаптивний розподіл завдань	Динамічне призначення завдань на основі ситуації	Глибинні Q-мережі (DQN), розподілені нейронні мережі	Підвищення ефективності, гнучкості в управлінні завданнями, зменшення робочого навантаження	Вимагає неперервних обчислень, ризик неоптимального розподілу	Затримка в прийнятті рішень через поєднання централізованого та децентралізованого контролю.
4	Ройовий інтелект	Злагожене стримування вогню	Методи штучного інтелекту в тісній роботі з PSO, ACO	Універсальність, що дозволяє використовувати велику кількість БПЛА, адаптивна гнучкість до змін і втрат	Складні алгоритми взаємодії, високі вимоги до зв'язку та зв'язності у великих роях, ризик непередбачуваної поведінки всього рою	Проблеми з координацією у великих зграях.
5	Прогнозна аналітика для поширення пожежі	Прогнозування поширення пожежі	Повторювані нейронні мережі (RNN), засоби машинного навчання для аналізу часових рядів	Проактивне реагування на прогнози розвитку пожеж, виявлення потенційних зон високого ризику	Великий обсяг даних для навчання, високі ціни та вимоги до обладнання для коректної роботи моделі, залежність від центрального пункту керування	Не характерно для окремих БПЛА, оскільки їм не вистачає потужності для прогнозування.
6	Кооперативне спостереження	Постійний моніторинг великої території	Багатоагентне навчання з підкріпленням (MARL), розподілені сенсорні мережі, федеративне навчання	Постійний моніторинг, підвищена точність, знижений ризик втрати інформації	Високі вимоги до зв'язку та координації, необхідні складні алгоритми, можливі затримки або помилки в обробці даних	Забезпечення узгоджених даних для БПЛА.

Штучний інтелект, інтегрований у рій БПЛА, відкриває двері до нових можливостей у моніторингу та управлінні лісовими пожежами. Хоча кожне рішення штучного інтелекту має низку переваг, воно також створює нові проблеми, пов'язані з ко-

ординацією, комунікацією та вимогами до обчислень. Таким чином, інтеграція штучного інтелекту в рій БПЛА реалізує трансформаційний підхід у моніторингу лісових пожеж, що стане можливим у більшому масштабі завдяки об'єднанню зусиль. Інстру-

менти штучного інтелекту наразі були використані в цих системах у формі спільного картографування пожеж, децентралізованого прийняття рішень, адаптивного розподілу завдань, ройового інтелекту, прогнозу аналітики та кооперативного спостереження, щоб оптимізувати їх. Кожне рішення має переваги та, водночас, виклики з точки зору зв'язку, координації та обчислювальних потреб. Завдяки об'єднанню можливостям багато з цих проблем можна згодом подолати.

Архітектури взаємодії рою БПЛА

Вибрана архітектура систем моніторингу лісових пожеж на базі рою БПЛА визначає ефективність, надійність і масштабованість операцій. Різні архітектури по-різному використовують програми штучного інтелекту, кожен з яких відповідає певним оперативним потребам. Далі буде розглянуто різні варіанти архітектури щодо їхньої придатності для застосування ШІ, підкреслюючи, чому певні методи ШІ є особливо ефективними в кожній архітектурі.

У централізованій архітектурі, де БПЛА діють переважно як збирачі даних, майже вся обробка виконується в центральному блоці керування. Як правило, це наземні станції управління [23] або висотні платформи, як більш потужні БПЛА іншого типу [24], які грають роль центрального блоку управління. Через різні можливості їх буде розглянуто окремо.

В першому випадку, коли БПЛА діють лише як пристрій для збору даних для наземної станції, усі або переважна більшість функцій обробки виконуються на ній [23]. Ця архітектура найбільш прийнятна для методів ШІ, що вимагають високоінтенсивних обчислень. Однак вагомою проблемою такої централізованої обробки є ймовірність затримки відповіді та вразливість системи до слабого зв'язку. Відповідь системи, таким чином, не відповідає вимогам системи реального часу, що є обов'язковою у високодинамічному сценарії пожежі.

Таку централізовану архітектуру можна вдосконалити за допомогою літаючої хмари, де більш важкий БПЛА, оснащений значними обчислювальними ресурсами, виконуватиме роль мобільного центру обробки даних [24]. Це архітектура, яка здатна значною мірою використовувати засоби штучного інтелекту, які вимагають обробки в реальному часі поблизу джерела даних. Незважаючи на те, що ця архітектура зменшує затримку та збільшує можливості обробки, це відбувається за рахунок збільшення вартості та складності: літаючі хмарні БПЛА мають бути достатньо надійними, щоб нести потужні процесори. Ефективність також залежатиме від того, наскільки ефективна координація між літаючою хмарою та меншими БПЛА, а для цього потрібні складні алгоритми штучного інтелекту.

У розподіленій архітектурі, де БПЛА оснащені граничними обчислювальними можливостями, кожен БПЛА виконує часткову обробку даних, які він збирає [25]. Така архітектура найбільше підходить для додатків ШІ, де негайне локальне рішення є обов'язковим, в той час як традиційна інфраструктура недоступна або може бути обмеженою. Однак

така розподілена архітектура дозволяє розгортати лише прості моделі ШІ через низьку обчислювальну потужність, яку може внести один БПЛА. Це призводить до менш точного та менш повного аналізу порівняно з центральною обробкою.

Ієрархічна архітектура успадковує переваги централізованих і розподілених систем, дозволяючи граничну бортову обробку на БПЛА, і в той же час координуючись з центральним блоком, будь то на землі або в літаючій хмарі [26]. Ця архітектура буде особливо придатною для програм штучного інтелекту, які вимагають відповіді у реальному часі та складного аналізу. Має ієрархічну структуру, отже, збалансовує час відгуку та обчислювальну потужність. Натомість вимагає ефективної координації та зв'язку між БПЛА та центральним блоком. Це підвищує складність системи в поєднанні з пов'язаними з цим помилками в разі збою зв'язку.

Гібридна архітектура включає в себе комбінації попередніх архітектур, які використовуються разом з метою об'єднання переваг та зменшення обмежень. Прикладом такої архітектури є розподілена з граничними обчисленнями з ройовим інтелектом [27]. БПЛА самостійно оброблюють дані на борту, при цьому працюючи як рій для досягнення спільних цілей. Це дуже схоже на звичайну розподілену архітектуру, але відмінність полягає в тому, що дрони працюють в рою, а не тільки поодиночки, що дозволяє отримувати більше інформації кожному дрону. Ще одним прикладом такої архітектури є поєднання централізованого та розподіленого управління з можливістю динамічного перемикавання ролей. ШІ може дозволити центральному блоку брати під контроль ситуацію у критичних ситуаціях, наприклад, під час пожежі, яка швидко поширюється, але залишати БПЛА автономними за нормальних умов чи відсутності зв'язку. Приклад такої взаємодії – коли штучний інтелект у центральному блоці може надавати директиви високого рівня під час пожежі, яка швидко поширюється, а БПЛА точно налаштовувати свої дії на основі уникнення перешкод або коригування висоти через щільність диму за допомогою бортового штучного інтелекту.

Після огляду різних архітектур для моніторингу лісових пожеж на основі БПЛА дві з них видаються найбільш перспективними через правильний баланс у масштабованості, ефективності обробки даних та адаптивності у різних сценаріях моніторингу пожеж: граничні обчислення за гібридної архітектури керування та архітектури літаючої хмари із поєднанням централізованої та розподіленої архітектур.

Архітектура граничної обробки поєднується з гібридною моделлю керування [28], де кожен БПЛА підтримує бортову обробку, яка має можливості аналізу даних у реальному часі. Це може включати такі методи як виявлення та розпізнавання об'єктів, аномалій, планування шляху, об'єднання даних з різних датчиків у реальному часі. Можуть бути використані наступні методи штучного інтелекту: глибинні нейронні мережі CNN, YOLO, R-CNN, SVM, LSTM, методи машинного навчання RL, DRL

тощо. До цього також додається метод ройового інтелекту, за якого дрони можуть обмінюватися інформацією для підвищення точності та кращого покриття. Але при цьому існує певний наземний центральний пункт керування, який може надавати БПЛА інформацію про глобальну стратегію та не давати їм відхилятися від запланованого курсу для мінімізації непередбачуваності у ройовій поведінці. При цьому, якщо зв'язок із пунктом втрачається, БПЛА можуть продовжувати групову задачу далі, спираючись на власні ресурси.

У літаючій хмарі з централізованими та розподіленими елементами рій універсальних БПЛА доповнюється важчим і потужнішим дроном, який виконує роль літаючої хмари [29]. Цей дрон є своєрідним мобільним обчислювальним центром, який виконує більш складні обчислення та стає центральним вузлом у розподіленій мережі, тоді як інші БПЛА здійснюють попередній збір та обробку да-

них. Ця архітектура успадковує переваги граничних обчислень, з обчислювальною потужністю центрального блоку, що знаходиться ближче до зони дії, ніж наземні станції. Тому тут можна використовувати моделі, які використовуються для роїв БПЛА, як от спільне картографування пожежі, прогнозна аналітика поширення пожежі, кооперативне спостереження. В основі цієї архітектури лежить штучний інтелект, який дає можливість літаючій хмарі обробляти та робити прогнози на основі величезних обсягів даних, координувати поведінку рою та приймати відповідні рішення. Сучасні моделі штучного інтелекту, такі як глибинні нейронні мережі RNN, GNN, Q-мережі, багатоагентне навчання з підкріпленням MARL, розподіленні нейронні мережі, а також алгоритми оптимізації гарантують, що система може адаптуватися до мінливих умов і ефективно контролювати та стримувати лісові пожежі. Результати аналізу архітектур наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Архітектури взаємодії БПЛА

№	Рішення	Переваги	Недоліки
1	Централізована (центральний блок управління - наземна станція)	Простий у впровадженні та управлінні, високий рівень контролю та злагодженості.	Єдина точка відмови, обмежена масштабованість, висока залежність від лінії зв'язку, обмежена автономність БПЛА.
2	Централізована (центральний блок управління - потужний БПЛА)	Зменшення залежності від наземних станцій і зв'язку, гнучкість використання, швидке розгортання в динамічних середовищах.	Єдина точка відмови, центральний БПЛА вимагає значних ресурсів, високе обчислювальне навантаження на центральний БПЛА.
3	Розподілена	Висока відмовостійкість, можливість масштабування до великих розмірів рою, автономне прийняття рішень, зменшена затримка зв'язку між БПЛА.	Вищі обчислювальні вимоги до кожного БПЛА, можливість прийняття суперечливих рішень, потрібні розширені алгоритми поведінки рою, що додає складність реалізації та координації.
4	Ієрархічна	Поєднує в собі сильні сторони централізованої та розподіленої архітектур, гнучкість роботи з балансом автономності та контролю, ефективний розподіл ресурсів, багаторівневий контроль якості.	Складність проектування та управління, можливі затримки зв'язку між різними рівнями ієрархії, потрібні складні алгоритми координації, вища вартість через кілька рівнів блоків керування.
5	Гібридна архітектура (розподілена з ройовим інтелектом)	Зменшення залежності від центральних блоків через використання граничних обчислень, висока стійкість, покращено ройовий інтелект і адаптивність, ефективна обробка великих наборів даних у режимі реального часу.	Підвищені вимоги до апаратного забезпечення БПЛА, збільшене енергоспоживання через інтенсивні обчислення, висока складність у впровадженні та обслуговуванні, можливість появи вузьких місць у комунікації.
6	Граничні обчислення за гібридної архітектури керування (в критичних ситуаціях центр бере на себе керування)	Висока автономність із підвищеною безпекою та надійністю у критичних ситуаціях, оптимізоване обчислювальне навантаження під час регулярних операцій, зменшення загальної складності.	Можливі затримки перемикавання керування під час критичних ситуацій, складність визначення моменту перемикавання керування, може призвести до неефективного використання обчислювальних ресурсів у некритичних ситуаціях.
7	Розподілена з літаючою хмарою	Поєднання в собі сильних сторін централізованої і розподіленої архітектур, динамічна та адаптивна структура керування, ефективне використання обчислювальних ресурсів шляхом розподілення обчислень, висока масштабованість і гнучкість.	Потрібна надійна і високошвидкісна комунікація, висока складність координації та управління даними.

Дискусія. Обґрунтування напрямку і задач досліджень

В даній статті ставилася задача детального аналізу можливостей використання засобів штучного

інтелекту в мобільних системах моніторингу лісових пожеж на базі одиничних БПЛА, а також їхніх керування роїв. На підставі аналізу визначено переваги і обмеження існуючих рішень, а також можливі варіанти архітектур. Порівняння архітектур за якісними

показниками надало змогу сформувані рекомендації щодо їхнього використання і вибору раціональних варіантів. Отже, ці результати надають змогу визначити мету і завдання подальших досліджень. Метою досліджень має бути підвищення ефективності мобільних інтелектуальних систем моніторингу і запобігання лісових пожеж на базі роїв БПЛА шляхом розроблення і впровадження нових моделей, методів і архітектур, що базуються на розподілених засобах штучного інтелекту. Під ефективністю таких систем розуміємо відносно збільшення показників точності, достовірності та оперативності ідентифікації пожеж на одиницю витрат.

Основні завдання:

- розроблення і експериментальне дослідження розподілених моделей штучного інтелекту мобільних систем для моніторингу, запобігання, ліквідації та оцінки наслідків лісових пожеж за горизонтальною (ройовою, на рівні взаємодії окремих БПЛА) і вертикальною (інфраструктурною, що об'єднує наземні, бортові, граничні і хмарні ресурси) складовими;

- розроблення та порівняльний аналіз відповідних множин архітектур, окреслених в даній статті, за обґрунтованими кількісними показниками. Визначення на цій підставі можливості побудови гібридних інтелектуальних систем на базі роїв БПЛА з адаптивною архітектурою, яка змінюється залежно від зміни параметрів середовища, виникнення та динаміки розповсюдження пожежі;

- розроблення системи (архітектури, програмних засобів і інтерфейсів) підтримки прийняття рішень щодо обґрунтування складу роїв БПЛА для інтелектуальних систем моніторингу і запобігання пожеж, їхнього розгортання та надійного і безпечного використання в умовах реальних обмежень.

Висновки

Дане дослідження визначає ключові засоби і методи штучного інтелекту як для окремих, так і для рою БПЛА, підкреслюючи їхній потенціал у моніторингу лісових пожеж.

Після детального аналізу різних архітектур можна забезпечити суттєве зростання роїв БПЛА та їхньої ефективності завдяки інтеграції ШІ. Це демонструє, що поєднання різних гібридних архітектур зі спеціальними рішеннями штучного інтелекту, виявляється дуже перспективним для ефективного моніторингу, картографування, стримування та визначення наслідків пожежі.

Визначено напрями майбутніх досліджень, які планується спрямувати: у теоретичному сенсі – на розроблення моделей і методів ройового інтелекту мобільних систем екологічного моніторингу, зокрема лісових пожеж, у практичному – на розроблення та впровадження відповідних програмно-апаратних рішень для ІТ-інфраструктури роїв БПЛА, яка об'єднує бортові, граничні та хмарні ресурси та забезпечує виконання основних вимог.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Cunningham Calum X., Williamson Grant J., Bowman David M.J.S. (2024). Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth. *Nat Ecol Evol.* 8. PP. 1420–1425. 10.1038/s41559-024-02452-2.
- Sadowska Beata, Zimon Grzegorz, Stepnicka Nina. (2021). Forest Fires and Losses Caused by Fires – An Economic Approach. *WSEAS TRANSACTIONS ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT.* 17. PP. 181-191. 10.37394/232015.2021.17.18.
- Francesco Carta, Zidda Chiara, Putzu Martina, Loru Daniele, Anedda Matteo, Giusto Daniele. (2023). Advancements in Forest Fire Prevention: A Comprehensive Survey. *Sensors.* 23. 6635. 10.3390/s23146635.
- Omar Madiyah Binti, Ibrahim Rosdiazli, Bingi Kishore, Haikal Wan Mohd Nadzri Wan Muhammad, Faqih Mochammad. (2023). Real-Time UAV System Integration for Fire Detection and Classification. *IEEE International Conference on Computing.* PP. 237-241. 10.1109/ICOCO59262.2023.10397888.
- Jia Xuanbo, Wang Yike, Chen Taiming. (2023). Forest Fire Detection and Recognition Using YOLOv8 Algorithms from UAVs Images. *IEEE 5th International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems.* PP. 646-651. 10.1109/ICPICS58376.2023.10235675.
- Xie Feifei, Huang Zhiqing. (2023). Aerial Forest Fire Detection based on Transfer Learning and Improved Faster RCNN. *IEEE 3rd International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence.* PP. 1132-1136. 10.1109/ICIBA56860.2023.10165603.
- Avola Danilo, Cinque Luigi, Di Mambro Angelo, Diko Anxhelo, Fagioli Alessio, Foresti Gian Luca, Marini Marco Raoul, Mecca Alessio, Pannone Daniele. (2022). Low-Altitude Aerial Video Surveillance via One-Class SVM Anomaly Detection from Textural Features in UAV Images. *Information.* 13. 2. 10.3390/info13010002.
- Yang Lei, Zhang Yizong, Li Shaobo, Zhang Ansi, Liao Zihao, Li Chuanjiang. (2023). UAV Flight Data Anomaly Detection Based on Parameter Selection and Multiple Regression. *Global Reliability and Prognostics and Health Management Conference.* PP. 1-6. 10.1109/PHM-Hangzhou58797.2023.10482575.
- Umunnakwe Amarachi, Davis Katherine. (2023). An Optimization of UAV-Based Remote Monitoring for Improving Wildfire Response in Power Systems. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy.* 10. PP. 678-688. 10.1109/OAJPE.2023.3337760.
- Habiba Ummey, Jahan Roshan. (2023). Path Planning for UAV “Drones” Using SARSA: Enhancing Efficiency and Performance. *International Conference on Integration of Computational Intelligent System.* PP. 1-6. 10.1109/ICICIS56802.2023.10430246.
- Hu Qiao, Zhang Ligang, Drahotka Jeff, Woldt Wayne, Varner Dana, Bishop Andy, LaGrange Ted, Neale Christopher M. U., Tang Zhenghong. (2024). Combining Multi-View UAV Photogrammetry, Thermal Imaging, and Computer Vision Can Derive Cost-Effective Ecological Indicators for Habitat Assessment. *Remote Sensing.* 16. 1081. 10.3390/rs16061081.
- Wang Shaofan, Li Ke, Chen Jiaao, Zhang Tao. (2023). Unmanned Aerial Vehicle Autonomous Visual Landing through Visual Attention-Based Deep Reinforcement Learning. *42nd Chinese Control Conference.* PP. 4143-4148. 10.23919/CCC58697.2023.10240825.

13. Mu Yunjie, Ou Liyuan, Chen Wenjing, Liu Tao, Gao Demin. (2024). Superpixel-Based Graph Convolutional Network for UAV Forest Fire Image Segmentation. *Drones*. 8. 142. 10.3390/drones8040142.
14. Shrestha Kripash, La Hung Manh, Yoon Hyung-Jin. (2022). A Distributed Deep Learning Approach for A Team of Unmanned Aerial Vehicles for Wildfire Tracking and Coverage. *Sixth IEEE International Conference on Robotic Computing*. PP. 312-319. 10.1109/IRC55401.2022.00061.
15. Yang Luyinru, Zheng Jun, Zhang Baoxian. (2023). An MARL-based Task Scheduling Algorithm for Cooperative Computation in Multi-UAV-Assisted MEC Systems. *International Conference on Future Communications and Networks*. PP. 1-6. 10.1109/FCN60432.2023.10544292.
16. Akbari Mohammad, Syed Aisha, Kennedy W. Sean, Erol-Kantarci Melike. (2024). AoI-Aware Energy-Efficient SFC in UAV-Aided Smart Agriculture Using Asynchronous Federated Learning. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 5. PP. 1222-1242. 10.1109/OJCOMS.2024.3363132.
17. Yin Yongfeng, Guo Yang, Su Qingran, Wang Zhetao. (2022). Task Allocation of Multiple Unmanned Aerial Vehicles Based on Deep Transfer Reinforcement Learning. *Drones*. 6. 215. 10.3390/drones6080215.
18. Alsammak Ihab L. Hussein, Mahmoud Moamin A., Gunasekaran Saraswathy Shamini, Ahmed Ali Najah, AlKilabi Muhanad. (2023). Nature-Inspired Drone Swarming for Wildfires Suppression Considering Distributed Fire Spots and Energy Consumption. *IEEE Access*. 11. PP. 50962-50983. 10.1109/ACCESS.2023.3279416.
19. Chen Shihan, Ma Jialu. (2022). *IEEE Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science*. PP. 1006-1011. 10.1109/TOCS56154.2022.10015980.
20. Liang Hao, Zhang Meng, Wang Hailan. (2019). A Neural Network Model for Wildfire Scale Prediction Using Meteorological Factors. *IEEE Access*. 7. PP. 176746-176755. 10.1109/ACCESS.2019.2957837.
21. Chhabra Rishi, Bhagat Aditya, Mishra Gaurav, Tiwari Ashish, Dhabu M.. (2024). Machine Learning and Deep Learning-Based Prediction and Monitoring of Forest Fires Using Unmanned Aerial Vehicle. *Applications of Machine Learning in UAV Networks*. PP. 160-193. 10.4018/979-8-3693-0578-2.ch007.
22. Mariam Ayesha, Mushtaq Memoona, Iqbal Muhammad Munwar. (2022). Real-Time Detection, Recognition, and Surveillance using Drones. *International Conference on Emerging Trends in Electrical, Control, and Telecommunication Engineering*. PP. 1-5. 10.1109/ETEECTE55893.2022.10007285.
23. Kristanto Andri, Indriyanto Toto. (2024). Development of Communication System for UAV Ground Control Station with ATC Based on Controller Pilot Data Link Communication. *Warta Penelitian Perhubungan*. 35. PP. 112-125. 10.25104/warlit.v35i2.2308.
24. Andreadis Alessandro, Giambene Giovanni, Zambon Riccardo. (2023). Role of UAVs and HAPS for IoT-based Monitoring in Emergency Scenarios. *International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management*. PP. 1-8. 10.1109/ICT-DM58371.2023.10286916.
25. Fesenko Herman, Illiashenko Oleg, Kharchenko Vyacheslav, Kliushnikov Ihor, Morozova Olga, Sachenko Anatoliy, Skorobohatko Stanislav. (2023). Flying Sensor and Edge Network-Based Advanced Air Mobility Systems: Reliability Analysis and Applications for Urban Monitoring. *Drones*. 7. 409. 10.3390/drones7070409.
26. Masood Arooj, Nguyen The-Vi, Truong Thanh Phung, Cho Sungrae. (2021). Content Caching in HAP-Assisted Multi-UAV Networks Using Hierarchical Federated Learning. *International Conference on Information and Communication Technology Convergence*. PP. 1160-1162. 10.1109/ICTC52510.2021.9621115.
27. Chen Wu, Zhu Jiayi, Liu Jiajia, Guo Hongzhi. (2024). A fast coordination approach for large-scale drone swarm. *Journal of Network and Computer Applications*. 221. 10.1016/j.jnca.2023.103769.
28. Ma Li, Lin Bin, Zhang Wen, Tao Jingjing, Zhu Xiaomin, Chen Hao. (2022). A Survey of Research on the Distributed Cooperation Method of the UAV Swarm based on Swarm Intelligence. *IEEE 13th International Conference on Software Engineering and Service Science*. PP. 305-309. 10.1109/ICSESS54813.2022.9930182.
29. Zaitseva Elena, Levashenko Vitaly, Mysko Vladimir, Czapp Stanislaw, Zhaxybayev, Darkhan. (2024). Availability of UAV Fleet Evaluation Based on Multi-State System. *IEEE Access*. 12. PP. 15290-15307. 10.1109/ACCESS.2024.3358198.

Received (Надійшла) 22.08.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.10.2024

Methods and hardware and software for information processing in intelligent forest fire monitoring systems based on UAV swarms

Stanislav Popov, Oleksandr Oriekhov

Abstract. Artificial intelligence methods for forest fire monitoring systems based on UAV swarms were investigated. The methods used both for individual UAVs and for different architectures using a UAV swarm are considered. AI integration has been shown to enhance UAV capabilities for early fire detection, real-time monitoring and decision-making. The study found that while the information collected by individual UAVs is valuable, there are limitations that can be overcome by using a UAV swarm that augments intelligent computing capabilities. Different architectures – centralized, distributed and hybrid – have been proven to provide unique advantages in different fire monitoring scenarios. The study emphasized the importance of choosing a rational architecture based on specific monitoring tasks. Each architecture has certain limitations, but the proposed solutions are marked by improvements in efficiency, reliability and scalability. The final configuration consists of a combination of UAVs and AI tools designed to maximize the effectiveness of fire monitoring. The development of the potential of swarm intelligence, predictive analytics and adaptive task allocation is identified as an important direction for future research. It is noted that these results are important for the development of new management systems for monitoring, preventing, limiting and determining the consequences of forest fires based on UAV swarms.

Keywords: forest fires, monitoring, intelligent systems, unmanned aerial vehicles, UAV swarms, hybrid architectures, artificial intelligence.

Roman Rastegayev¹, Vitalii Martovytskyi¹, Natalia Bolohova¹, Bohdan Filonenko², Oleksandr Chechui²

¹ Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

² Ivan Kozhedub Kharkiv National University of the Air Force, Kharkiv, Ukraine

REVIEW OF METHODS FOR EMBEDDING DIGITAL WATERMARKS FOR AUDIO FILE PROTECTION

Abstract. The article presents an analysis of modern approaches to audio information protection using digital watermarks. It discusses various watermark embedding methods, including those based on the time, frequency, and time-frequency domains. Special attention is given to the characteristics of watermark robustness and imperceptibility, which are critical for ensuring high sound quality and reliable protection against attacks. Methods based on transformations, such as the discrete cosine transform (DCT), as well as adaptive approaches that take into account the properties of audio files, are analyzed. The article also provides an overview of criteria for evaluating the effectiveness of watermarking methods, such as signal-to-noise ratio (SNR) and detection probability. The conclusions of the study emphasize the need for careful selection of methods to achieve an optimal balance between protection, sound quality, and resistance to manipulation.

Keywords: steganography, digital watermark, information protection, audio information protection.

Introduction

The rapid development of information and communication technologies (ICT) and their convergence has led to a dramatic increase in the volume of digital content that is created, stored, distributed, and used across various fields. The term "content" in a broad sense refers to any digital information, such as audio, video, graphics, animation, images, text, or any combinations of these types. This digital content can be easily accessed, copied, quickly distributed, and widely used without quality loss, unlike the situation with earlier analog media, such as audio cassettes and VHS tapes. However, these advantages of digital media formats over analog ones turn into disadvantages in terms of copyright management, as the ability for unlimited copying without loss of authenticity has led to significant financial losses for copyright holders [1].

To reduce financial losses from unauthorized copying, content owners most often turn to cryptography, which is one of the most widely used methods of digital content protection. When cryptographic methods are used, the content is encrypted before being provided to the consumer, and then the decryption key is given only to those who have purchased legal copies of the content. However, cryptographic methods do not offer a reliable solution for combating content piracy. For example, a pirate can legally purchase the encrypted content and then use the decryption key to illegally produce and distribute copies of the content. In other words, once the content is decrypted, it no longer has any further protection.

Thus, there is an urgent need for an alternative or complement to cryptographic methods for protecting audio content. To address the issues faced by cryptography, watermarking has been proposed, as it has the potential to offer greater reliability. Watermarks can protect digital content during its normal use, as copyright information is embedded in the content in such a way that it cannot be removed. This unique feature of watermarks makes them one of the most promising methods for digital content protection, which has been a motivating factor for most research in the past two decades.

Problem statement and its connection to important scientific or practical tasks

Digital Watermarks (DW) in audio files are one of the modern technologies for copyright protection, increasingly applied in the music industry, media, and digital products. The main problem lies in ensuring reliable copyright protection while preserving the quality of audio content and maintaining resistance to various types of attacks.

In order to better understand the process of embedding watermarks in digital audio and subsequently identify some unresolved issues in current implementations, a comprehensive literature review was conducted. The algorithms examined are diverse and therefore divided into different categories, such as time-domain-based algorithms, transform-domain-based algorithms, and hybrid algorithms, according to the methodology employed by each. The advantages and disadvantages of key algorithms in each category are reviewed based on the following criteria:

- performance in terms of imperceptibility, robustness, capacity, and computational complexity: Each algorithm is evaluated based on how well it ensures that the watermark remains undetectable to the human ear (imperceptibility), its ability to withstand attacks (robustness), the amount of information the watermark can carry (capacity), and the computational resources required (complexity).

- reliability of the results presented for each algorithm: This involves examining the testing methodology used, such as the types of tests conducted (e.g., resistance to attacks, quality checks) and whether the results are reproducible and applicable to real-world scenarios.

- determining if the embedded digital watermark can be removed: This focuses on the algorithm's ability to resist removal attempts, such as through manipulation or degradation of the audio file.

- determining if the algorithms incorporate additional processes to bypass the trade-off between imperceptibility and robustness: Some algorithms may implement extra techniques or processes to balance the

need for the watermark to be both imperceptible and resilient against tampering, ensuring that neither aspect is compromised.

This comprehensive analysis aims to uncover gaps and strengths in existing approaches and point towards improvements in digital watermarking techniques for audio files.

The reason for choosing the aforementioned criteria is that they are critical factors for evaluating the effectiveness of watermarking algorithms in practical applications. Furthermore, these criteria are useful in determining whether further research on the reviewed algorithms is warranted.

Quantitative Evaluation of the Performance of Digital Watermarking Methods for Audio Files

In order for digital watermarks (DW) to effectively perform their function, it is necessary to evaluate their efficiency using quantitative methods. Such an evaluation includes analyzing various aspects, such as the imperceptibility of the watermark, its robustness against attacks, and its ability to be accurately extracted.

Let's consider the main criteria for the quantitative evaluation of the effectiveness of audio watermarks. These criteria include:

- imperceptibility (Integration): The watermark must be imperceptible to the listener, meaning it should not degrade the quality of the audio.

- robustness: The watermark should remain unchanged and recognizable even after applying various types of processing, such as compression, editing, or noise attacks.

- extractability: It is important that the watermark can be reliably extracted and recognized using specialized algorithms.

- computational efficiency: The process of embedding and extracting the watermark should be efficient in terms of computational resources and time.

The discussed criteria are key factors that influence the evaluation of watermarking algorithms and determine their practical value. Let's analyze each of these aspects, present methods for their quantitative assessment, and discuss the testing results of various watermarking algorithms using real audio files as examples.

The goal is to provide a comprehensive overview of the methods for quantitatively assessing the effectiveness of audio watermarks and to conduct a thorough evaluation of digital watermarking methods. This will contribute to the further development of copyright protection technologies and enhance their reliability in the digital environment. In general, there are three approaches to evaluating the perceptual quality of audio:

- subjective assessment through human listening tests;

- objective assessment using signal-oriented methods, such as Signal-to-Noise Ratio (SNR);

- objective assessment that incorporates a model of the human auditory system (HAS), such as Perceptual Evaluation of Audio Quality (PEAQ).

Subjective assessment can be conducted in several ways. One approach involves using the ABX test. Each

test consists of the original audio file A, the watermarked audio file B, and an unknown audio file X, which can be either A or B. The listener is asked to determine whether X is A or B. A high level of correct identification indicates that the watermark is noticeable, while approximately 50% correct identification suggests that the watermark is imperceptible, as the identification resembles random guessing.

In addition, the Mean Opinion Score (MOS) can be used to evaluate the subjective quality of listening to watermarked content. The MOS is a scale that quantifies listener perceptions, where higher scores indicate better quality. The MOS rating scale is presented in Table 1.

However, subjective evaluation based on human listening tests is time-consuming, and the results may be inconsistent among different listeners. This inconsistency arises because the auditory abilities of different listeners vary depending on factors such as age, exposure to loud sounds throughout life, and even personal musical preferences. Additionally, some listeners may be trained expert listeners. Therefore, it can sometimes be challenging to fairly compare different subjective assessment results, and it is preferable to have a more objective evaluation based on specific signal characteristics.

Table 1 – Systematization of Attacks on Watermarks

MOS	5	4	3	2	1
Description	Excellent	Good	Satisfactory	Poor	Very Poor

The Signal-to-Noise Ratio (SNR) is widely used as an objective measure of sound quality. It is easy to interpret, straightforward to apply, and signal-oriented. According to the recommendation of the International Federation of the Phonographic Industry (IFPI), when the SNR exceeds 20 decibels (dB), audio watermarks will be considered imperceptible. SNR can be formulated as follows:

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\sum_n s^2(n)}{\sum_n [s(n) - s'(n)]^2}, \quad (1)$$

where $s(n)$ is the time-domain original signal, and $s'(n)$ is the time-domain watermarked signal.

Since equation (1) equally weights all errors in the time domain without considering the energy that varies over time and distortions that change over time, an improved estimate can be obtained by calculating the SNR for short frames and averaging the results. The frame measure, referred to as "Segmental Signal-to-Noise Ratio" (SNRseg), is defined as follows:

$$SNR_{seg} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M 10 \log_{10} \left[\sum_{n=N*(j-1)+1}^{N*j} \frac{s^2(n)}{[s(n) - s'(n)]^2} \right], \quad (2)$$

where M is the number of frames, and N is the frame size.

Problems with SNRseg arise when including silent frames, as they can lead to large negative values for SNRseg. This issue can be addressed by setting a low threshold and replacing all frames with SNR_{seg} values below this threshold with the threshold level

(a reasonable threshold is 0 dB). On the other hand, frames with SNRseg values above 35 dB are not perceived by listeners as significantly different but still affect the resulting SNRseg. The upper threshold (typically 35 dB) can be used to cap any unusually high SNRseg values to this upper limit.

A low SNR or SNRseg clearly indicates that the distortions introduced by watermarks are audible; however, a high SNR or SNRseg is not sufficient to claim that the watermark is imperceptible, as this measure does not take into account any model of the Human Auditory System (HAS). Based on numerous experiments, the behavior of HAS has been thoroughly investigated by many researchers. These studies have made significant progress in defining the characteristics of HAS. Some terms have been proposed, such as "absolute threshold of hearing," "simultaneous masking," and "temporal masking."

The "absolute threshold of hearing" characterizes the amount of energy required for a pure tone to be recognized by a listener in a silent environment. "Masking" is the phenomenon where one sound becomes inaudible due to the presence of another sound. This phenomenon can occur in the frequency domain, known as "simultaneous masking," or in the time domain, referred to as "temporal masking." To more accurately reflect human perception, it is preferable to have an objective assessment that incorporates one of the HAS models.

PEAQ is one such objective assessment method. It has been defined as a recommended standard in BS.1387. The result of PEAQ is the Objective Difference Grade (ODG). It classifies the perceptual differences between the original audio signal and the watermarked audio signal. The ODG values range from [-4, 0], as shown in Table 2, where 0 means that both signals are perceived as identical, and -4 indicates that the differences between them are "very annoying." Thus, the closer the ODG value is to zero, the greater the likelihood that the signals are perceived as identical.

Table 2 – Description of the ODG Indicator

ODG	0	-1	-2	-3	-4
Description	Imperceptible	Perceptible but not annoying	Slightly annoying	Annoying	Very annoying

The correlation between PEAQ and subjective listening tests has been investigated. It was found that the correlation coefficients are 0.837 and 0.851 for the basic and extended versions of PEAQ, respectively. Undoubtedly, PEAQ cannot fully replace subjective listening tests, but it is a widely accepted objective measure of sound quality in the industry and is extensively used to evaluate the imperceptibility of watermarking algorithms. The accuracy of a watermarking algorithm is defined as the accuracy of detecting a watermark without the influence of any attack. It can be measured by the bit error rate (BER) [17], which is defined by the formulas:

$$BER(W_1, W_2) = \frac{\sum_{i=1}^N W_1(i) \oplus W_2(i)}{N} \quad (3)$$

where W_1 and W_2 denote the original watermark bit sequence and the detected watermark bit sequence, respectively, N represents the number of bits, and i denotes the bit index. In this article, "accuracy" is used to evaluate performance, as it is more straightforward. It is defined as follows:

$$\begin{aligned} Precision(W_1, W_2) &= \frac{N - \sum_{i=1}^N W_1(i) \oplus W_2(i)}{N} = \quad (4) \\ &= 1 - BER(W_1, W_2). \end{aligned}$$

The value of each variable is the same as in equation (3). If N audio signals are used in the experiment, the average accuracy, denoted as Precision mean, is calculated using formula (5), where i is the signal index.

$$Precision_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^N Precision_i}{N}. \quad (5)$$

The robustness of the watermarking algorithm is defined as the accuracy of watermark detection after attacks. It can also be measured using Bit Error Rate (BER). Similarly, accuracy is used to assess robustness.

Generally, to enhance robustness, a "repetition" process is included in the scheme, where the same sequence of watermark bits is repeated. On the detection side, the "mode" operation is used to identify the watermark bit sequence. In statistics, the "mode" operation is used to find the most frequently occurring data in a given dataset. For example, in the dataset {0, 1, 0, 1, 1}, the mode is "1," as it occurs one more time than "0." The procedure for incorporating the "repetition" process into the watermarking scheme can be formalized as follows:

1. Generate the watermark bit sequence B_w for the signal to be watermarked.
2. At the embedding stage, insert B_w into the signal, say d times.
3. At the detection stage, the detected bit sequence B_e is divided into d groups: $B_{e1}, B_{e2}, \dots, B_{ed}$. The i -th bit of the detected watermark bit sequence B'_w is determined as the mode of the bit set $\{B_{e1,i}, B_{e2,i}, \dots, B_{ed,i}\}$.

The capacity of the watermark can be measured as the number of bits per second (bps). Assuming the duration of the audio recording is k seconds and the number of bits in the embedded watermark is n , the bandwidth is given by n/k bps.

Computational efficiency can be assessed as the processing time required for embedding and detecting watermarks. This depends on the implementation platform.

Overview of Audio Watermarking Algorithms

The variety of available algorithms can be categorized based on the methodology they employ. The vast majority of audio watermarking algorithms fall into three main categories:

1. Time-Domain Algorithms.
2. Frequency-Domain Algorithms.
3. Hybrid Algorithms.

Watermarking algorithms belonging to each of these three categories will be discussed in detail further.

Time-domain algorithms literally embed the watermark into the time domain. They are simple to implement. Many time-domain algorithms have been developed [19-21]. However, algorithms in this category are less robust against attacks, and statistical methods are often employed to enhance their robustness [22].

Let's consider two main algorithms in this category: the Least Significant Bit (LSB) algorithm and the Echo Hiding algorithm.

LSB (Least Significant Bit) is one of the earliest methods for embedding watermarks in audio as well as other types of digital content. The standard approach involves embedding watermark bits by altering the values of certain samples in the digital audio. The watermark bits are detected by comparing the modified sample values with the original sample values.

The primary advantage of this algorithm is its ability to achieve exceptionally high capacity. However, its main drawback is its extremely low robustness, as random signal alterations can destroy the watermark. It is very unlikely that the embedded watermark bits will survive DAC (Digital-to-Analog Converter) and subsequent ADC (Analog-to-Digital Converter) processes. Additionally, altering the quantization values introduces low-power additive white Gaussian noise, which makes this algorithm less transparent to perception, as listeners are very sensitive to this type of noise.

A significant improvement to the standard LSB algorithm was proposed in the paper [22]. The main idea is that after embedding watermark bits by manipulating a single bit of a 16-bit WAV sample, all other 15 bits of the sample can also be altered in such a way that the difference between the original sample value and the manipulated sample value is minimized. As a result, this leads to reduced distortions.

For example, if the original 16-bit sample value is "000000000001000" in binary format, and the watermark bit to be embedded is "0," suppose the watermark bit is embedded in the fourth least significant bit of the sample. Instead of creating the value "000000000000000" in binary, as would be expected in the standard algorithm, the improved algorithm also flips the first three bits of the sample, creating the value "000000000000111" in binary. Consequently, the difference between the original sample and the manipulated sample is only 1 in decimal notation, which is the closest possible to the original sample value. Thus, the distortions introduced are minimized.

Echo hiding embeds watermark bits by introducing an "echo signal." An echo is a reflection of sound that reaches the listener some time after the direct sound [24]. Four parameters of the echo are used: the initial amplitude, the decay rate of the echo signal's amplitude, the "unit" shift (delay time to the original signal), and the "zero" shift. As the shift between the original and the echo signal decreases, the two signals merge. At a certain point, the human ear hears not the original signal and the echo but one mixed signal. It is challenging to determine the exact moment when this occurs, as it depends on the quality of the original recording, the type

of sound being echoed, and the listener. The algorithm employs two different kernels: the "unit" kernel, which is used to generate the echo signal with a "unit" shift corresponding to a binary "1," and the "zero" kernel, which is used to generate the echo signal with a "zero" shift corresponding to a binary "0" [25].

Transformation-based algorithms typically embed watermark bits by utilizing the properties of data in the post-transformation representation. Popular transformations include the Fast Fourier Transform (FFT), Discrete Cosine Transform (DCT), and Discrete Wavelet Transform (DWT) [26-27]. Some methods, such as Quantization Index Modulation (QIM), Singular Value Decomposition (SVD), and interpolation, are often used to manipulate data to embed watermark bits in the post-transformation representation. Many watermarking algorithms fall into this category, as the embedded watermark bits are more resistant to attacks.

The HAS model is typically used to minimize the perceptual distortions introduced during watermark embedding. However, there is a trade-off involved, as embedding watermark bits into perceptually significant components is more robust but less transparent to perception. On the other hand, embedding watermark bits into less perceptually significant components is less robust but more transparent to perception. Additionally, using the HAS model increases computational time, limiting the applicability of these algorithms in time-critical applications. Typical algorithms in this category will be discussed further. The FFT was developed as a fast version of the Discrete Fourier Transform (DFT). The DFT is a well-known and powerful computational tool for performing frequency analysis of discrete time signals. It takes a discrete signal in the time domain and transforms it into a discrete frequency domain. Numerous watermarking algorithms have been proposed that are based on manipulating the components contained in the FFT spectrum. Most algorithms manipulate the magnitudes of the FFT components and enhance robustness against typical audio compression systems by incorporating the HAS model.

The scheme proposed in [27] selects a set of frequencies by comparing the FFT spectrum of the original signal with that of the corresponding compressed decompressed signal. Watermark bits are embedded at those frequencies that have similar magnitudes in both spectra. However, this selection leads to perturbations in the output signal at the most significant frequencies, which is undesirable from a perceptual transparency perspective. The scheme proposed in [28] introduces some randomness into the frequency selection process, allowing for improved transparency at the cost of some robustness. All of these schemes are not blind, meaning that the spectrum of the output signal is required to detect the embedded watermark bits.

The algorithm proposed in [29] embeds watermark bits based on spline interpolation of data obtained from the FFT transformation. The embedding process is illustrated in Fig. 1. As shown in the figure, FFT analysis is applied to each frame (i.e., short segment) of the output signal to obtain the magnitudes of the odd bits. Then, the interpolated values of the even segments are obtained through spline interpolation of the odd segment

values. The watermark bits are embedded by manipulating these spline-interpolated values of the even segments. Finally, the watermarked signal is reconstructed using the inverse FFT.

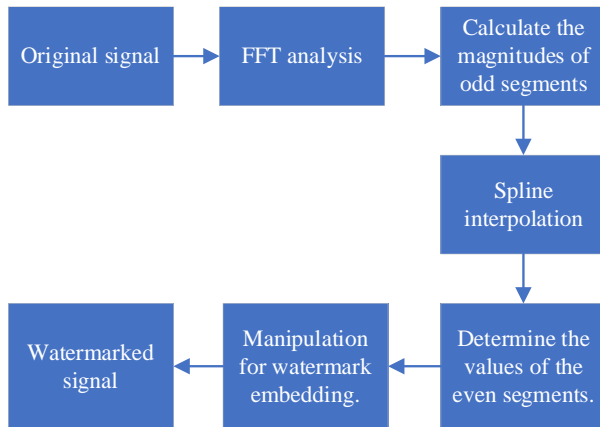


Fig. 1. Process of embedding in the algorithm proposed in [29]

As seen in Fig. 2, FFT analysis is applied to the watermarked signal to obtain the values of the odd and even segments based on each frame. Spline interpolation is then used to derive the interpolated values of the even segments. These interpolated even bit values are compared with the even bit values obtained via FFT to detect the watermark bits. The process of watermark detection is presented in Fig. 2.

This algorithm achieves a high bitrate of about 3000 bits per second and is resilient to most attacks. The average ODG score is -0.5, which is acceptable. The computational efficiency of this algorithm is high, as it only involves interpolation, FFT, and inverse FFT processes. A drawback of this algorithm is that the embedded watermark bits can be easily removed since the embedding positions are known. Additionally, since this algorithm is based solely on comparing values that can be easily disrupted, it will be vulnerable to certain attacks. Finally, since the test was based on only five songs from a single album, the assessment was limited.

This algorithm achieves a high bitrate of approximately 3000 bits per second and is resilient to most attacks. The average ODG score is -0.5, which is acceptable. The computational efficiency of this algorithm is high, as it only involves interpolation, FFT, and inverse FFT processes. A drawback of this algorithm is that the embedded watermark bits can be easily removed since the embedding positions are known. Additionally, because this algorithm is based solely on comparing values that can be easily disrupted, it will be vulnerable to certain attacks. Finally, since the test was conducted based on only five songs from a single album, the assessment was limited.

Hybrid algorithms are new algorithms, such as the Chirp coding algorithm [30], the "patchwork encryption" algorithm [31], and the SVD-based algorithm [32], that cannot be easily classified into either of the two aforementioned categories. The primary reason for highlighting this category is to emphasize their novelty. An example of one of these algorithms will be examined in detail below.

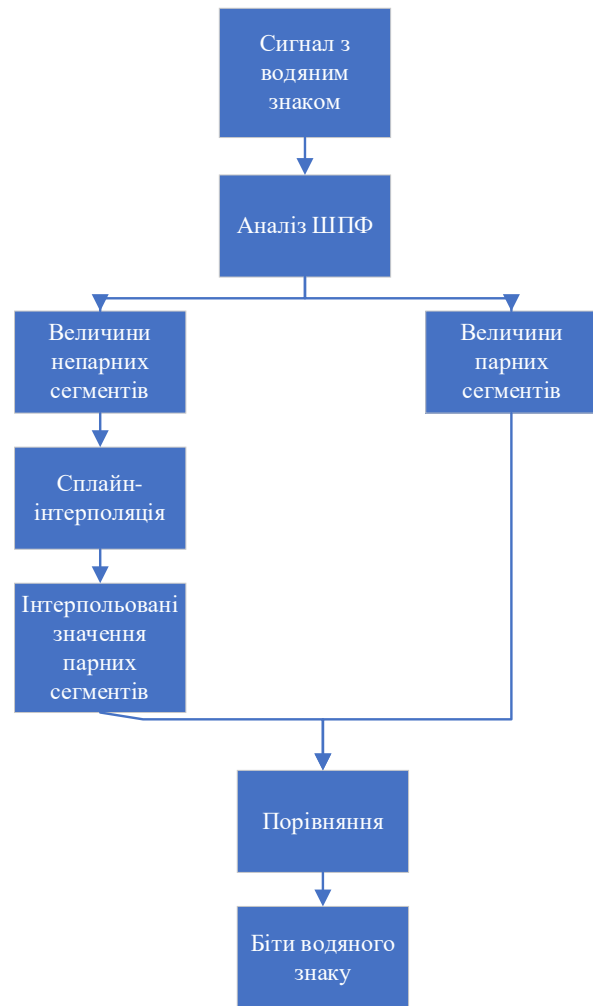


Fig. 2. The watermark detection process proposed in the article [29]

In [33], a fragile watermarking algorithm was proposed. The embedding process can be described as follows: first, a 7-level wavelet decomposition of the signal is performed to obtain 7 levels of "detail" coefficients. To measure the global effect of watermarking on the signal, the "approximation" coefficients at the 7th level are also used. Thus, a total of 8 decomposition vectors are generated. The reason for using the "detail" coefficients is that they are highly sensitive to attacks such as lossy compression and audio trimming. Then, the percentage of energy of each vector is calculated relative to the total energy of the 8 vectors. These percentages are rounded to the nearest whole number and converted into a binary stream that will be used as the watermark bit sequence.

Next, a Chirp function is created. This function is then multiplied by a new signal formed based on the binary sequence and scaled by a predetermined scaling factor to obtain the Chirp code. This Chirp code is added to the original signal to create the watermarked signal. To make the watermark inaudible, the generated Chirp code has very low frequency and amplitude.

On the detection side, the same Chirp function used during the embedding process is applied to the watermarked signal. This allows the watermark bits to be recovered. Subsequently, it can be verified whether

the signal has been tampered with by comparing the restored sequence of watermark bits with a potentially altered binary stream that can be generated directly from the watermarked signal.

In terms of this algorithm, the embedded watermarks are difficult to remove from the host signal, as both the starting and ending frequencies of the Chirp function are determined at the user's discretion, and its position in the data stream can be varied through shifting. All these parameters collectively form a private key. Listening tests have shown no perceptual difference between the original signal and the watermarked signal. The recovery of the Chirp code is uniquely robust even in cases of very low SNR, making this algorithm easily adaptable as a robust watermarking technique.

Thus, various popular algorithms developed for watermarking audio files have been discussed. To compare all these algorithms, imperceptibility is evaluated uniformly using the Mean Opinion Score (MOS), and the Objective Difference Grade (ODG) can be directly correlated with the MOS score, as shown in Table 3.

Tables 3-5 summarize the results of typical algorithms that have been reviewed. The Chirp-coding-based audio watermarking algorithm is not included in these tables because it was originally developed as a fragile watermark. However, it has significant potential for development as a robust watermarking algorithm. Table 4 presents four main characteristics of each watermarking algorithm: imperceptibility, assessed by MOS; robustness; bitrate; and computational efficiency. Table 5 lists some other characteristics of the algorithms.

Table 3 – Relationship Between MOS and ODG

ODG	0	-1	-2	-3	-4
MOS	5	4	3	2	1

Table 4 – Four Main Characteristics of Each Typical Audio Watermarking Algorithm

	LSB	Echo hiding	FFT
Imperceptibility	5	5	4.5
Robustness	Low	Low	Low
Capacity	44100	n/a	3000
Efficiency	High	n/a	High

Table 5 – Other characteristics of each audio watermarking algorithm

	LSB	Echo hiding	FFT
Invisibility.	+	-	+
Additional processing	-	-	-
Extractability	Easy	Difficult	Easy
Reliability	-	+	+

Tables 4 and 5 show that different algorithms have different strengths and weaknesses.

Conclusions

The article discussed different approaches to protecting audio files using digital watermarks. There are a large number of methods for applying digital watermarks, which can be classified according to various criteria: by the type of signal, the method of embedding, the place of embedding, resistance to attacks and other parameters. The most important characteristics of watermarks are their resistance to attacks (in particular, to changes and manipulations of audio files) and invisibility to the listener. This means that the watermark should not affect the sound quality, but should be strong enough to withstand various types of audio processing.

Methods that use the frequency or time-frequency domain for watermarking are often more resistant to attacks and changes compared to methods that work in the time domain. Transform-based methods such as discrete cosine transform (DCT) and others are widely used. These techniques allow watermarks to be embedded in a way that makes them less vulnerable to attack. Adaptive methods that take into account the properties of the audio file when embedding the watermark can significantly improve both the robustness and imperceptibility of watermarks.

Various metrics such as signal-to-noise ratio (SNR), detection probability, and others are used to evaluate the performance of watermarking methods. Experimental studies show that the combined use of different methods can provide better results.

The choice of a particular method depends on the specific requirements and conditions of use, such as the level of protection required, the acceptable changes in sound quality, and the expected types of attacks.

REFERENCES

- Corporate Kaijus Clash: 15 Famous Copyright Infringement Cases [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.abounaja.com/blogs/copyright-infringement-cases>
- Zhou, N.R., Hou, W.M.X., Wen, R.H. et al. Imperceptible digital watermarking scheme in multiple transform domains. *Multimed Tools Appl* 77, 30251–30267 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11042-018-6128-9>
- Hosny, Khalid M., and Mohamed M. Darwish. "Invariant image watermarking using accurate polar harmonic transforms." *Computers & Electrical Engineering* 62 (2017): 429-447. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.05.015>
- Tao, H., Chongmin, L., Zain, J. M., & Abdalla, A. N. (2014). Robust image watermarking theories and techniques: A review. *Journal of applied research and technology*, 12(1), 122-138.
- Yuan, X. C., & Li, M. (2018). Local multi-watermarking method based on robust and adaptive feature extraction. *Signal Processing*, 149, 103-117. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2018.03.007>
- Yamni, M., Karmouni, H., Sayyouri, M., & Qjidaa, H. (2022). Efficient watermarking algorithm for digital audio/speech signal. *Digital Signal Processing*, 120, 103251. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103251>
- M. Torcoli, T. Kastner and J. Herre, "Objective Measures of Perceptual Audio Quality Reviewed: An Evaluation of Their Application Domain Dependence," in *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 29, pp. 1530-1541, 2021, doi: 10.1109/TASLP.2021.3069302.
- P. M. Delgado and J. Herre, "A Data-Driven Cognitive Salience Model for Objective Perceptual Audio Quality Assessment," *ICASSP 2022 - 2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Singapore, Singapore, 2022, pp. 986-990, doi: 10.1109/ICASSP43922.2022.9747064.

9. Greenspun, Philip, and Leigh Klotz. "Audio analysis VI: testing audio cables." *Computer Music Journal* 12.1 (1988): 58-64.
10. Streijl, R.C., Winkler, S. & Hands, D.S. Mean opinion score (MOS) revisited: methods and applications, limitations and alternatives. *Multimedia Systems* 22, 213–227 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00530-014-0446-1>
11. J. Zhang, K. Tan, J. Zhao, H. Wu and Y. Zhang, "A Practical SNR-Guided Rate Adaptation," *IEEE INFOCOM 2008 - The 27th Conference on Computer Communications*, Phoenix, AZ, USA, 2008, pp. 2083-2091, doi: 10.1109/INFOCOM.2008.274.
12. Deller Jr, John R., John G. Proakis, and John H. Hansen. *Discrete time processing of speech signals*. Prentice Hall PTR, 1993.
13. Moore, J. K., & Linthicum, F. H. (2007). The human auditory system: A timeline of development. *International Journal of Audiology*, 46(9), 460–478. <https://doi.org/10.1080/14992020701383019>
14. Vecchi, A. O., Varnet, L., Carney, L. H., Dau, T., Bruce, I. C., Verhulst, S., & Majdak, P. (2022). A comparative study of eight human auditory models of monaural processing. *Acta Acustica*, 6, 17. <https://doi.org/10.1051/aacus/2022008>
15. Becerra Martinez, H.; Hines, A.; Farias, M.C.Q. Perceptual Quality of Audio-Visual Content with Common Video and Audio Degradations. *Appl. Sci.* 2021, 11, 5813. <https://doi.org/10.3390/app11135813>
16. Kabal, Peter. "An examination and interpretation of ITU-R BS. 1387: Perceptual evaluation of audio quality." TSP Lab Technical Report, Dept. Electrical & Computer Engineering, McGill University (2002): 1-89.
17. Juliy, Boiko, Andriy, Mokrytsky; Пяа, Pyatin. ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ. Хмельницького національного університету, 2022, 113. DOI 10.31891/2307-5732-2022-313-5-113-121
18. Griffiths, Dawn. *Head first statistics*. O'Reilly Germany, 2008.
19. Y. Xiong and Z. X. Ming, "Covert Communication Audio Watermarking Algorithm Based on LSB," *International Conference on Communication Technology, ICCT 06*, pp. 1-4, 2006.
20. B. S. Ko, R. Nishimura, and Y. Suzuki, "Time-spread Echo Method for Digital Audio Watermarking," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol.7(2), pp. 212-221, 2005.
21. H. O. Oh, J. W. Seok, J. W. Hong, and D. H. Youn, "New Echo Embedding Technique for Robust and Imperceptible Audio Watermarking," *Proc. ICASSP 2001*, pp. 1341-1344, 2001.
22. Wang, Xiang-Yang, Pan-Pan Niu, and Hong-Ying Yang. "A robust digital audio watermarking based on statistics characteristics." *Pattern recognition* 42.11 (2009): 3057-3064. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2009.01.015>
23. N. Cvejic and T. Seppänen, "Increasing robustness of LSB audio steganography by reduced distortion LSB coding," *Journal of University Computer Science*, vol. 11(1), pp. 56-65, 2005.
24. N. Rashmi, "Analysis of Audio Steganography combined with Cryptography for RC4 and 3DES Encryption," *2020 Fourth International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, Coimbatore, India, 2020, pp. 210-214, doi: 10.1109/ICISC47916.2020.9171142.
25. Gruhl, Daniel, Anthony Lu, and Walter Bender. "Echo hiding." *Information Hiding: First International Workshop Cambridge, UK, May 30–June 1, 1996 Proceedings 1*. Springer Berlin Heidelberg, 1996.
26. Huang, HN., Chen, ST., Lin, MS. et al. Optimization-Based Embedding for Wavelet-Domain Audio Watermarking. *J Sign Process Syst* 80, 197–208 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11265-013-0863-y>
27. Masmoudi, S., Charfeddine, M. & Ben Amar, C. A Semi-Fragile Digital Audio Watermarking Scheme for MP3-Encoded Signals Using Huffman Data. *Circuits Syst Signal Process* 39, 3019–3034 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00034-019-01299-4>
28. D. Megias, J. H. Joancomartí, and J. Minguillón, "Total Disclosure of the Embedding and Detection Algorithms for a Secure Digital Watermarking Scheme for Audio," *ICICS 2005*, pp. 427-440, 2005.
29. M. Fallahpour and D. Megas, "High capacity audio watermarking using FFT amplitude interpolation," *IEICE Electronics Express*, vol. 6 (14), pp. 1057–1063, 2009.
30. C. Cai, Z. Chen, J. Luo, H. Pu, M. Hu and R. Zheng, "Boosting Chirp Signal Based Aerial Acoustic Communication Under Dynamic Channel Conditions," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 21, no. 9, pp. 3110-3121, 1 Sept. 2022, doi: 10.1109/TMC.2021.3051665
31. He, J., Liu, Z., Lin, K. et al. A novel audio watermarking algorithm robust against recapturing attacks. *Multimed Tools Appl* 82, 18599–18616 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11042-022-14197-w>
32. Abdelwahab, Khaled M., et al. "Efficient SVD-based audio watermarking technique in FRT domain." *Multimedia Tools and Applications* 79 (2020): 5617-5648.
33. J.Blackledge, "Digital Watermarking and Self-Authentication using Chirp Coding," *ISAST Transactions on Electronics and Signal Processing*, ISSN 1797-2329, vol. 1 (1), pp. 61 – 71, 2007.

Received (Надійшла) 13.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.11.2024

Огляд методів нанесення цифрових водяних знаків для захисту аудіофайлів

Р. І. Растегаєв, В. О. Мартовицький, Н. М. Бологова, Б. В. Філоненко, О. В. Чечуй

Анотація. У статті викладено аналіз сучасних підходів до захисту аудіоінформації за допомогою цифрових водяних знаків. Розглянуто різні методи вбудовування водяних знаків, включаючи ті, що базуються на часовій, частотній та часово-частотній областях. Особлива увага приділена характеристикам стійкості та непомітності водяних знаків, які є критичними для забезпечення високої якості звуку та надійного захисту від атак. Проаналізовано методи на основі перетворень, такі як дискретне косинусне перетворення (DCT) також адаптивні підходи, що враховують властивості аудіофайлів. Стаття також містить огляд критеріїв оцінки ефективності методів водяних знаків, таких як співвідношення сигнал/шум (SNR) та ймовірність виявлення. Висновки дослідження підкреслюють необхідність ретельного вибору методів для досягнення оптимального балансу між захистом, якістю звуку та стійкістю до маніпуляцій.

Ключові слова: стеганографія, цифровий водяний знак, захист інформації, аудіоінформація.

В. М. Рудницький^{1,2}, Н. В. Лада^{1,2}, В. В. Ларін¹, Д. А. Підласий²

¹ Державний НДІ випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Черкаси, Україна

² Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

ДИСКРЕТНО-КАЗУАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ФУНКЦІЙ ОПЕРАЦІЙ КЕРОВАНИХ ІНФОРМАЦІЄЮ

Анотація. У статті запропоновано метод багатоваріантного синтезу дискретно-казуальних моделей елементарних функцій операцій керованих інформацією. Реалізація даного методу розширить можливості проектування мало ресурсних пристроїв реалізації SET-операцій для побудови криптографічних систем з подвійним управлінням процесом шифрування. Для даних систем захисту інформації управління процесом шифрування буде визначатися як ключем, так і інформацією яка зашифровується. Дискретно-казуальні моделі елементарних функцій операцій керованих інформацією порівняно з дискретно-алгебраїчними моделями суттєво зменшую складність реалізації багатоперандних SET-операцій, так як їх представлення, дозволяє при об'єднанні використовувати методи мінімізації. Збільшення кількості варіантів представлення дискретно-казуальних моделей елементарних функцій дозволить забезпечити впровадження декількох стратегій їх об'єднання для спрощення моделей побудованих SET-операцій. Багатоваріантність дискретно-казуальних моделей елементарних функцій операцій керованих інформацією дозволяє інтегрувати їх в SET-операціях сумісно з дискретно-казуальними моделями елементарних функцій перестановок керованих інформацією. Сфера використання отриманих результатів: мобільні і стаціонарні системи малоресурсного криптографічного захисту конфіденційної інформації.

Ключові слова: малоресурсна криптографія, SET-шифрування, операції керовані інформацією, елементарні функції, дискретно-казуальні моделі, потокове шифрування.

Вступ

Постановка проблеми. Одним із позитивних наслідків стрімкого розвитку комп'ютерних мереж і телекомунікаційних систем стало створення глобального інформаційного простору. Негативною стороною стало виникнення кіберзлочинності, протидія якій вимагає захисту конфіденційної інформації. Одним з провідних напрямів захисту інформації був і залишається криптографічний захист [1]. За останні десятиріччя системи криптографічного захисту набули значного розвитку [2, 3]. На сьогоднішній день особливо актуальною є малоресурсна криптографія, адже саме вона забезпечує захист інформації в обмежених часових та енергетичних умовах [4, 5]. Одним із шляхів розвитку малоресурсної криптографії є побудова шифрів на основі SET-операцій (Cryptographic Encoding Theory – операції) [6]. SET-операції представляють собою дискретні моделі таблиць підстановок які реалізуються в SET-шифрах. Зменшення складності дискретних моделей SET-операцій для прямого і оберненого перетворення інформації приводить до зменшення ресурсів необхідних на реалізацію криптосистеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В монографії [6] представлені результати дослідження архітектури SET-операцій, та принципів побудови технологій потокового шифрування на їх основі. Проте особливості побудови самих моделей SET-операцій не розглядалися. Побудова дискретних моделей SET-операцій пов'язана з складністю опису лінійних і нелінійних перетворень за допомогою єдиного математичного апарату достатньо складна і не завжди ефективна [7]. Серед нелінійних SET-операцій особливе місце займають операції керовані інформацією [7]. Адже саме застосування SET-операцій забезпечує подвійне управління процесом

шифрування. Результат шифрування буде залежати як від криптографічного ключа, так і від інформації, яка зашифровується.

Відповідно до [7] SET-операції керовані інформацією поділяються на SET-операції перестановок керованих інформацією і SET-операції на основі елементарних функцій керованих інформацією.

Стаття [8] присвячена синтезу дискретно-алгебраїчних моделей елементарних функцій операцій керованих інформацією. В статті [9] запропоновано використовувати дискретно-казуальне представлення моделей елементарних функцій і SET-операцій. Результати дискретно-казуального моделювання SET-операції перестановок керованих інформацією наведені в [10]. В роботах [7-10] відмічається що побудова всіх SET-операцій і елементарних функцій керованих інформацією починається з визначення ключового елементу моделі (вхідної змінної) яке забезпечує управління процесом перетворення.

Однозначність визначення ключового елементу приводить до однозначності побудови SET-операцій для прямого і оберненого криптографічного перетворення.

Проте в елементарних функціях операцій керованих інформацією ключовим елементом може бути будь яка вхідна змінна, що повинно привести до збільшення кількості моделей і криптографічного перетворення і розширенні можливостей при моделюванні SET-операцій.

Метою роботи є розробка методу багатоваріантного синтезу дискретно-казуальних моделей елементарних функцій операцій керованих інформацією який розширить можливості проектування мало ресурсних пристроїв реалізації SET-операцій для побудови криптографічних систем з подвійним управлінням процесом шифрування.

Основний матеріал

Група елементарних функцій операцій керованих інформацією включає в себе 8 елементарних функцій [11]. Дискретні моделі даних елементарних функцій наведені в табл. 1. Індекс елементарної функції відповідають значенню десяткової цифри результату перетворення її двійкового коду згідно упорядкованої таблиці істинності.

Таблиця 1 – Елементарні функції операцій, керованих інформацією

Елементарна функція	Елементарна функція
$f_{23}(x) = x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3$	$f_{232}(x) = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3$
$f_{43}(x) = x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3$	$f_{212}(x) = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3$
$f_{77}(x) = x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3$	$f_{178}(x) = \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3$
$f_{113}(x) = \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3$	$f_{142}(x) = x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3$

Серед наведених в табл.1 елементарних функцій 4 елементарні функції будуть прямими і 4 елементарні функції інверсними. Пряма і відповідна їй інверсна елементарні функції знаходяться в одному рядку табл.1. Для елементарних функцій операцій керованих інформацією невідомо які з них будуть прямими, а які інверсними. Тому умовно визначимо в якості прямих елементарних функцій елементарні функції з меншими індексами, які представлені в першому стовпці табл. 1.

На основі моделей елементарних функцій представлених в табл. 1 можна зробити висновок, що пряма елементарна функція відрізняється від інверсної інверсією відповідних Сі-кванті. Якщо, відома пряма елементарна функція, то побудувати інверсну можна інвертуванням і ній Сі квантів x_1 , x_2 і x_3 . Наприклад: інвертувавши вхідні Сі-кванти в функції $f_{43}(x) = x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3$, отримаємо $f_{212}(x) = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3$. І навпаки, при інвертуванні вхідних Сі-квантів в інверсній елементарній функції буде отримана пряма елементарна функція. Побудову інверсної елементарної функції операції керованої інформацією можна представити:

$$f_i(x) \oplus 1 = f_i(\bar{x}) = f_j(x), \quad (1)$$

де \oplus – додавання за модулем 2; $j = \bar{i}$ – десяткове представлення інверсного двійкового коду десяткового числа i .

Елементарна функція операції керованої інформацією реалізує вибір результату логічного множення, або логічного додавання двох Сі-квантів вхідної інформації в залежності від значення третього Сі-канта інформації.

Під Сі-квантом інформації підрозумівається мінімальний обсяг інформації з яким оперує СЕТ-операція (біт, байт, слово, ...) [6].

Використаємо дискретно-казуальне представлення моделей елементарних функцій операцій керованих інформацією [9].

Наприклад,

$$f_{23}(x) = x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3 = \begin{cases} x_2 \cdot x_3, & \text{якщо } x_1 = 0 \\ x_2 \vee x_3, & \text{якщо } x_1 = 1 \end{cases} = (x_2 \cdot x_3)(x_1)(x_2 \vee x_3).$$

Результати побудови елементарних функцій операцій керованих інформацією наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Елементарні функції операцій керованих інформацією

Елементарна функція	Елементарна функція
$f_{23}(x) = (x_2 \cdot x_3)(x_1)(x_2 \vee x_3)$	$f_{232}(x) = (\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3)(x_1)(\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3)$
$f_{43}(x) = (x_2 \cdot \bar{x}_3)(x_1)(x_2 \vee \bar{x}_3)$	$f_{212}(x) = (\bar{x}_2 \vee x_3)(x_1)(\bar{x}_2 \cdot x_3)$
$f_{77}(x) = (\bar{x}_2 \cdot x_3)(x_1)(\bar{x}_2 \vee x_3)$	$f_{178}(x) = (x_2 \vee \bar{x}_3)(x_1)(x_2 \cdot \bar{x}_3)$
$f_{113}(x) = (x_2 \vee x_3)(x_1)(x_2 \cdot x_3)$	$f_{142}(x) = (\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3)(x_1)(\bar{x}_2 \vee \bar{x}_3)$

Аналіз табл. 2. показав, що елементарні функції $f_{113}(x)$ і $f_{142}(x)$ доречно поміняти місцями, що забезпечить наявність всіх варіантів інверсії Сі-квантів x_2 і x_3 . В результаті перестановки між стовпцями функції $f_{113}(x)$ і $f_{142}(x)$, в першому стовпці при нульовому значення змінної x_1 буде виконуватися логічне множення Сі-квантів, а при одиничному значенні логічне додавання Сі квантів. В другому стовпці навпаки, при нульовому значення змінної x_1 буде виконуватися логічне додавання Сі-квантів, а при одиничному значенні логічне множення Сі-квантів.

Дискретно-казуальні моделі мають властивість: інверсія результату реалізації функції управління приведе до перестановки місцями функцій перетворення [10]:

$$f(x) = (f_1(x))(f_2(x))(f_3(x)) = (f_3(x))(\overline{f_2(x)})(f_1(x)), \quad (2)$$

де $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_3(x)$ – будь які дискретні функції.

З врахуванням перестановки функції $f_{113}(x)$ і $f_{142}(x)$, і властивості (2) отримаємо елементарні функції операцій керованих інформацією, представлені в табл. 3. Упорядкована послідовність формування інверсій вхідних Сі-квантів наведена в табл. 4.

Таблиця 3 – Елементарні функції операцій керованих інформацією

Елементарна функція	Елементарна функція
$f_{23}(x) = (x_2 \cdot x_3)(x_1)(x_2 \vee x_3)$	$f_{232}(x) = (\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3)(\bar{x}_1)(\bar{x}_2 \vee \bar{x}_3)$
$f_{43}(x) = (x_2 \cdot \bar{x}_3)(x_1)(x_2 \vee \bar{x}_3)$	$f_{212}(x) = (\bar{x}_2 \cdot x_3)(\bar{x}_1)(\bar{x}_2 \vee x_3)$
$f_{77}(x) = (\bar{x}_2 \cdot x_3)(x_1)(\bar{x}_2 \vee x_3)$	$f_{178}(x) = (x_2 \cdot \bar{x}_3)(\bar{x}_1)(x_2 \vee \bar{x}_3)$
$f_{142}(x) = (\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3)(x_1)(\bar{x}_2 \vee \bar{x}_3)$	$f_{113}(x) = (x_2 \cdot x_3)(\bar{x}_1)(x_2 \vee x_3)$

Після формування набору інверсій будуватиметься модель елементарної функції операції керованої інформацією. Виходячи з цього табл. 4 можна назвати таблицею синтезу елементарних функцій.

Отримані в табл. 4 перші 4 елементарні функції будуть прямими, а наступні інверсними. Взаємозв'язок між прямими і інверсними елементарними функціями визначається відповідно до виразу (1),

або як: $N_{np} + N_{in} = 7$, де N_{np} – порядковий номер прямої елементарної функції ($N_{np} \in \{0, \dots, 3\}$); N_{in} – порядковий номер інверсної елементарної функції ($N_{in} \in \{4, \dots, 7\}$).

Таблиця 4 – Таблиця синтезу елементарних функцій

№ п/п	Код цифри			Сі-кванти			Синтезована елементарна функція
				x_1	x_2	x_3	
0	0	0	0	x_1	x_2	x_3	$f_{23}(x) = (x_2 \cdot x_3)(x_1)(x_2 \vee x_3)$
1	0	0	1	x_1	x_2	\bar{x}_3	$f_{43}(x) = (x_2 \cdot \bar{x}_3)(x_1)(x_2 \vee \bar{x}_3)$
2	0	1	0	x_1	\bar{x}_2	x_3	$f_{77}(x) = (\bar{x}_2 \cdot x_3)(x_1)(\bar{x}_2 \vee x_3)$
3	0	1	1	x_1	\bar{x}_2	\bar{x}_3	$f_{142}(x) = (\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3)(x_1)(\bar{x}_2 \vee \bar{x}_3)$
4	1	0	0	\bar{x}_1	x_2	x_3	$f_{113}(x) = (x_2 \cdot x_3)(\bar{x}_1)(x_2 \vee x_3)$
5	1	0	1	\bar{x}_1	x_2	\bar{x}_3	$f_{178}(x) = (x_2 \cdot \bar{x}_3)(\bar{x}_1)(x_2 \vee \bar{x}_3)$
6	1	1	0	\bar{x}_1	\bar{x}_2	x_3	$f_{212}(x) = (\bar{x}_2 \cdot x_3)(\bar{x}_1)(\bar{x}_2 \vee x_3)$
7	1	1	1	\bar{x}_1	\bar{x}_2	\bar{x}_3	$f_{232}(x) = (\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3)(\bar{x}_1)(\bar{x}_2 \vee \bar{x}_3)$

Унікальність елементарних функцій операцій керованих інформацією полягає в тому що будь який вхідний Сі-квант: x_1 , x_2 , або x_3 , може бути управляючим.

Продемонструємо це на прикладі $f_{23}(x)$. Функціональні схеми реалізації елементарної функції $f_{23}(x)$, в залежності від вибраних Сі-квантів управління наведені на рис. 1 – 3.

Як видно з рис. 1 – 3 Функціональні схеми реалізації елементарної функції $f_{23}(x)$ відрізняються лише нумерацією вхідних Сі-квантів.

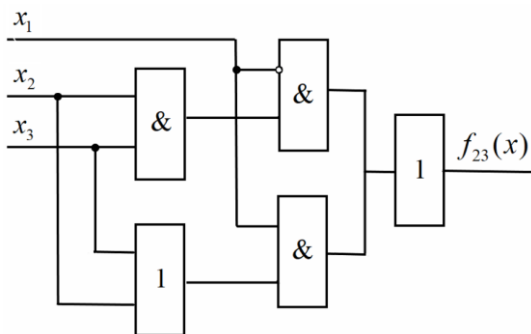


Рис. 1. Функція $f_{23}(x)$ при управлінні на основі x_1

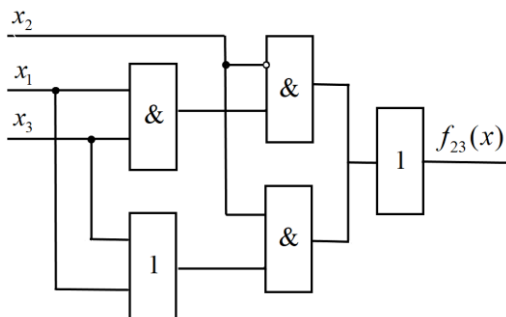


Рис. 2. Функція $f_{23}(x)$ при управлінні на основі x_2

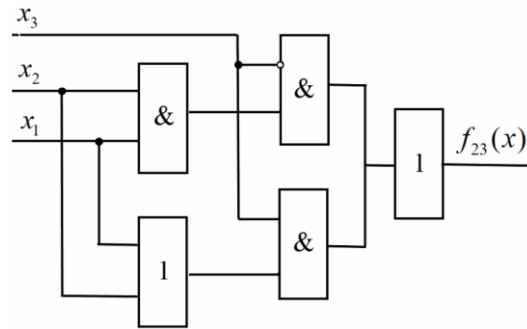


Рис. 3. Функція $f_{23}(x)$ при управлінні на основі x_3

Для елементарної функції $f_{23}(x)$ отримаємо:

$$f_{23} = (x_2 \cdot x_3)(x_1)(x_2 \vee x_3); \quad (3)$$

$$f_{23} = (x_1 \cdot x_3)(x_2)(x_1 \vee x_3); \quad (4)$$

$$f_{23} = (x_1 \cdot x_2)(x_3)(x_1 \vee x_2). \quad (5)$$

На основі моделей (3) – (5) можна зробити висновок, що три модифікації елементарної функції операцій керованих інформацією можна на основі трьох перестановок:

$$\tilde{x}_1 \leftrightarrow \tilde{x}_1; \tilde{x}_1 \leftrightarrow \tilde{x}_2; \tilde{x}_1 \leftrightarrow \tilde{x}_3. \quad (6)$$

Позначка над i -ю змінною \tilde{x}_i в моделі (6) – змінні переставляються разом з наявними інверсіями.

Синтез елементарних функцій операцій керованих інформацією відповідно до табл.4 і послідовна реалізація над кожною з них моделей перестановок (6) забезпечує багатоваріантну побудову повної множини елементарних функцій операцій керованих інформацією. Даний результат можна трактувати як метод багатоваріантного синтезу дискретно-казуальних моделей елементарних функцій операцій керованих інформацією. За результатами реалізації даного методу буде побудовано 24 дискретно-казуальні моделі елементарних функцій операцій керованих інформацією, які наведені в табл.5.

Таблиця 5 – Багатоваріантні модної елементарних функцій операцій керованих інформацією

Елементарна функція	Елементарна функція
$f_{23}(x) = (x_2 \cdot x_3)(x_1)(x_2 \vee x_3)$	$f_{232}(x) = (\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3)(\bar{x}_1)(\bar{x}_2 \vee \bar{x}_3)$
$f_{23}(x) = (x_1 \cdot x_3)(x_2)(x_1 \vee x_3)$	$f_{232}(x) = (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3)(\bar{x}_2)(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_3)$
$f_{23}(x) = (x_1 \cdot x_2)(x_3)(x_1 \vee x_2)$	$f_{232}(x) = (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2)(\bar{x}_3)(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2)$
$f_{43}(x) = (x_2 \cdot \bar{x}_3)(x_1)(x_2 \vee \bar{x}_3)$	$f_{212}(x) = (\bar{x}_2 \cdot x_3)(\bar{x}_1)(\bar{x}_2 \vee x_3)$
$f_{43}(x) = (x_1 \cdot \bar{x}_3)(x_2)(x_1 \vee \bar{x}_3)$	$f_{212}(x) = (\bar{x}_1 \cdot x_3)(\bar{x}_2)(\bar{x}_1 \vee x_3)$
$f_{43}(x) = (x_1 \cdot x_2)(\bar{x}_3)(x_1 \vee x_2)$	$f_{212}(x) = (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2)(x_3)(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2)$
$f_{77}(x) = (\bar{x}_2 \cdot x_3)(x_1)(\bar{x}_2 \vee x_3)$	$f_{178}(x) = (x_2 \cdot \bar{x}_3)(\bar{x}_1)(x_2 \vee \bar{x}_3)$
$f_{77}(x) = (x_1 \cdot x_3)(\bar{x}_2)(x_1 \vee x_3)$	$f_{178}(x) = (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3)(x_2)(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_3)$
$f_{77}(x) = (x_1 \cdot \bar{x}_2)(x_3)(x_1 \vee \bar{x}_2)$	$f_{178}(x) = (\bar{x}_1 \cdot x_2)(\bar{x}_3)(\bar{x}_1 \vee x_2)$
$f_{142}(x) = (\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3)(x_1)(\bar{x}_2 \vee \bar{x}_3)$	$f_{113}(x) = (x_2 \cdot x_3)(\bar{x}_1)(x_2 \vee x_3)$
$f_{142}(x) = (x_1 \cdot \bar{x}_3)(\bar{x}_2)(x_1 \vee \bar{x}_3)$	$f_{113}(x) = (\bar{x}_1 \cdot x_3)(x_2)(\bar{x}_1 \vee x_3)$
$f_{142}(x) = (x_1 \cdot \bar{x}_2)(\bar{x}_3)(x_1 \vee \bar{x}_2)$	$f_{113}(x) = (\bar{x}_1 \cdot x_2)(x_3)(\bar{x}_1 \vee x_2)$

Коректність запропонованого методу підтверджується співпадінням кількості побудованих дискретно-казуальних моделей з кількістю дискретно-алгебраїчних моделей наведених в [8]. Запропонований метод має меншу алгоритмічну складність порівняно з методом синтезу дискретно-алгебраїчних моделей елементарних функцій операцій керованих інформацією. Він не вимагає додаткового перетворення дискретно-алгебраїчних моделей в дискретно-казуальні моделі.

Висновки

Розроблено метод багатоваріантного синтезу дискретно-казуальних моделей елементарних функцій операцій керованих інформацією. Даний результат розширить можливості проектування мало ре-

сурсних пристроїв реалізації SET-операцій для побудови криптографічних систем з подвійним управлінням процесом шифрування.

Дискретно-казуальні моделі елементарних функцій операцій керованих інформацією порівняно з дискретно-алгебраїчними моделями суттєво зменшують складність реалізації багатооперандних SET-операцій. Збільшення кількості варіантів представлення дискретно-казуальних моделей елементарних функцій дозволить спростити процес побудови SET-операцій. Крім багатоваріантності дискретно-казуальних моделей елементарних функцій операцій керованих інформацією дозволяють інтегрувати їх в SET-операціях сумісно з дискретно-казуальними моделями елементарних функцій перестановок керованих інформацією.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Zheng, Z., Tian, K. & Liu, F. (2023). *Modern Cryptography Volume 2. A Classical Introduction to Informational and Mathematical Principle*. Springer: Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-7644-5>
- Ryan, M. (2021). *Evolution of Applied Cryptography*. In: *Ransomware Revolution: The Rise of a Prodigious Cyber Threat. Advances in Information Security*, vol 85. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66583-8_3
- Yalamuri, G., Honnavalli, P. & Eswaran, S. (2022). *A Review of the Present Cryptographic Arsenal to Deal with Post-Quantum Threats*. *Procedia Comput. Sci.* 215, 834–845. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.086>
- Sabani, M., et al. (2023). *Evaluation and Comparison of Lattice-Based Cryptosystems for a Secure Quantum Computing Era*. *Electronics*, 12(12), 2643. <https://doi.org/10.3390/electronics12122643>
- Khudoykulov, Z. (2024). *A Comparison of Lightweight Cryptographic Algorithms*. In: Aliev, R.A., et al. *12th World Conference "Intelligent System for Industrial Automation" (WCIS-2022)*. WCIS 2022. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 912. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53488-1_36
- Архітектура SET-операцій і технології потокового шифрування. *Architecture of SET-operations and stream encryption technologies: монографія* / В. М. Рудницький, Н. В. Лада, Г. А. Кучук, Д. А. Підласий. – Черкаси: вид. Пономаренко Р.В., 2024. – 374 с. <https://dndivsovt.com/index.php/monograph/issue/view/22/22>
- Бабенко Віра. Класифікація трирозрядних елементарних функцій для криптографічного перетворення інформації / Віра Бабенко, Ольга Мельник, Руслан Мельник // *Безпека інформації: наук. журнал*. – Київ : НАУ, 2013. – Том 19. – № 1. – С. 56–59. <https://jrn1.nau.edu.ua/index.php/Infosecurity/issue/view/220>.
- Рудницький В.М., Лада Н.В., Підласий Д.А., Мельник О. Г. Синтез дискретно-алгебраїчних моделей елементарних функцій операцій керованих інформацією. *Електронне фахове видання «Кибербезпека: освіта, наука, техніка»*. Київ: Київський університет імені Бориса Грінченка. Том 3 № 23 (2024): *Кибербезпека: освіта, наука* с. 6-16. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.23.616>
- Рудницький В.М., Ларін В.В., Мельник О. Г., Підласий Д. А. Дискретно-казуальне представлення моделей елементарних функцій і SET-операцій. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2023. №4 ст.96-101. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.4.096>.
- V. Rudnytskyi, N. Lada, V. Larin, D. Holovniak, H. Haponenko, D. Pidlasyi and T. Stabetska *Discrete and casual modeling of set-operations of data-controlled permutations*. *Journal of Xidian University* Volume 18 – Issue 6 – June 2024 Page No: 747-767. Doi.10.37896/jxu18.6/067
- Рудницький В. М., Бабенко В. Г., Жиляєв Д. А. Алгебраїчна структура множини логічних операцій кодування. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2011. Вип. 2 (6). С. 112–114.

Received (Надійшла) 10.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.11.2024

Discrete-casual modeling of elementary functions of operations controlled by information

V. Rudnitsky, N. Lada, V. Larin, D. Pidlasy

Abstract. The article proposes a method of multivariate synthesis of discrete-casual models of elementary functions of operations controlled by information. The implementation of this method will expand the possibilities of designing low-resource devices for the implementation of SET operations for the construction of cryptographic systems with double control of the encryption process. For these information protection systems, management of the encryption process will be determined by both the key and the information to be encrypted. Discrete-casual models of elementary functions of operations controlled by information, compared to discrete-algebraic models, significantly reduce the complexity of implementing multi-operand SET operations, since their representation allows the use of Boolean function minimization methods when combined. Increasing the number of options for presenting discrete-casual models of elementary functions will allow for the implementation of several strategies for combining them to simplify the models of constructed SET operations. The multivariate nature of discrete-casual models of elementary functions of operations controlled by information allows to integrate them in SET-operations compatible with discrete-casual models of elementary functions of operations controlled permutations. Scope of use of the obtained results: mobile and stationary systems of low-resource cryptographic protection of confidential information.

Keywords: low-resource cryptography, SET encryption, information-driven operations, elementary functions, discrete-casual models, stream encryption.

О. А. Середюк¹, І. М. Ключніков^{1,2}

¹ Національний аерокосмічний університет “Харківський авіаційний інститут”, Харків, Україна

² Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна

ГРУПОВЕ ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ ЗАСОБІВ: ВИКЛИКИ, РІШЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ХМАРНО-АГЕНТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Анотація. Застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та наземні роботизовані засоби (НРЗ) є актуальним трендом сьогодення. При цьому їх поодинокі застосування переходить до групового застосування, коли необхідно забезпечувати комунікацій та оптимальне використання ресурсів. **Предметом статті** є процеси групового застосування безпілотних літальних і наземних апаратів. **Мета статті** – проведення всебічного аналізу основних сфер застосування БПЛА і НРЗ, визначення методів оптимізації завдань для груп цих пристроїв, а також оцінка доцільності та перспектив впровадження хмарних технологій для розподілу завдань та оптимізації маршрутів. В **результаті роботи** визначено, що найбільш актуальними темами в галузі БПЛА та НРЗ є застосування хмарних технологій, інтеграція НРЗ у системи з БПЛА, розробка систем попередження пожеж та застосування методів машинного навчання. Вказані методи та технології активно застосовуються при вирішенні складних задач планування маршрутів та розподілу завдань у групах БПЛА та НРЗ. Але при цьому, недостатньо уваги приділяється впливу різноманітних погодних умов на роботу БПЛА та НРЗ, а також розрахунку надійності місії. Ці аспекти є критично важливими для практичного застосування безпілотних систем, особливо в складних умовах та при виконанні відповідальних завдань. розробці адаптивних алгоритмів, здатних враховувати динамічні зміни навколишнього середовища, та на створенні комплексних моделей оцінки надійності місії з урахуванням як технічних характеристик пристроїв, так і зовнішніх факторів. **Напрямок подальших досліджень** полягає у розробці адаптивних алгоритмів, здатних враховувати динамічні зміни навколишнього середовища, та створенні комплексних моделей оцінки надійності місії з урахуванням як технічних характеристик пристроїв, так і зовнішніх факторів.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; безпілотні наземні транспортні засоби; групове застосування; огляд досліджень; сучасні технології.

Вступ

Постановка проблеми. Безпілотні літальні апарати та наземні роботизовані засоби стрімко розширюють сфери свого застосування, демонструючи неабияку ефективність у різноманітних галузях - від моніторингу об'єктів [1, 2] і ліквідації наслідків стихійних лих до військових операцій. Проте їх групове використання породжує низку викликів, зокрема оптимальний розподіл завдань та забезпечення надійної комунікації між пристроями.

Для вирішення цих проблем сучасні підходи базуються на застосуванні штучного інтелекту (ШІ) та передових алгоритмів. Нещодавні дослідження демонструють, що ШІ суттєво підвищує ефективність роїв БПЛА, оптимізуючи їхні маршрути та поведінку в різноманітних сценаріях [3]. Завдяки інтеграції алгоритмів ШІ, одна система або оператор може керувати всіма літальними апаратами, розраховуючи оптимальні маршрути для кожного з них.

У контексті оптимізації планування маршрутів БПЛА, гібридні алгоритми виявилися найефективнішими, перевершивши еволюційні та роеві підходи. Дослідники наголошують на важливості оптимізації часу в математичних моделях та врахуванні динамічного середовища, що відображає прагнення до підвищення обчислювальної ефективності та адаптації до реальних умов [4].

Концепція багатоагентних систем набуває все більшої популярності [5], розширюючи можливості взаємодії між різними типами безпілотних транспортних засобів. У цьому контексті БПЛА стають частиною складної мережі робототехнічних систем, що дозволяє проводити комплексні операції та взаємодії між БПЛА

та НРЗ. Дослідження в цій галузі зосереджуються на координації різноманітних агентів для досягнення спільних цілей, розширюючи оперативні можливості безпілотних систем у групових умовах [6].

Особлива увага приділяється стратегіям координації та стабільності для БПЛА та НРЗ. Інноваційні підходи до планування та стабілізації маршрутів дозволяють агентам ефективно взаємодіяти в складних середовищах без залежності від зовнішніх систем позиціонування. Методи оптичної локалізації відкривають нові можливості для тісної співпраці між роями БПЛА та НРЗ у динамічних умовах [7].

Систематичний огляд біологічно-натхненних алгоритмів для планування траєкторії польоту груп БПЛА, проведений у статті [8], охоплює літературу з 2013 по 2021 рік. Дослідники проаналізували широкий спектр підходів, включаючи метод рою часток (англ. Particle Swarm Optimization, PSO), генетичні алгоритми, оптимізацію сірого вовка (англ. Gray Wolf Optimization, GWO) та оптимізацію мурашиної колонії (англ. Optimization of Ant Colony, ACO). Алгоритми були класифіковані як оригінальні, вдосконалені та гібридні, з урахуванням факторів представлення середовища (2D та 3D), динамічності, методів уникнення зіткнень та специфічних сфер застосування. Результати показали, що PSO є найпоширенішим алгоритмом, а більшість досліджень зосереджені на вдосконалених версіях біологічно-натхненних алгоритмів для вирішення конкретних завдань планування траєкторій груп БПЛА.

Однак, обмежена обчислювальна потужність БПЛА та НРЗ може стати суттєвою перешкодою для ефективного розрахунку маршрутів та розподілу завдань. У цьому контексті перспективним рішенням є

застосування хмарних обчислювальних технологій. Вони дозволяють перенести ресурсоемі обчислення на віддалені сервери, оптимізуючи продуктивність та знижуючи вартість окремих пристроїв.

Мета статті полягає у всебічному аналізі основних сфер застосування БПЛА і НРЗ, вивченні методів оптимізації завдань для груп цих пристроїв, а також оцінці доцільності та перспектив впровадження хмарних технологій для розподілу завдань та оптимізації маршрутів. Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання дослідження:

- проведення порівняльного аналізу актуальних способів використання БПЛА та НРЗ у різних галузях;

- визначення найбільш поширених напрямів досліджень та алгоритмів оптимізації шляху БПЛА та НРЗ;

- обґрунтування доцільності застосування хмарних технологій для оптимізації маршрутів та способів взаємодії БПЛА і НРЗ, з урахуванням необхідності забезпечення надійності та впливу навколишнього середовища.

Виклад основного матеріалу

Методологія аналізу останніх досліджень і публікацій. Був проведений аналіз публічно доступних статей і досліджень у галузі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та безпілотних наземних транспортних засобів (НРЗ). Основними джерелами для збору інформації були обрані авторитетні наукові платформи:

- ResearchGate – міжнародна соціальна мережа для науковців та дослідників.

- MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute) – видавництво рецензованих наукових журналів відкритого доступу.

- SpringerLink – онлайн-платформа, що надає доступ до мільйонів наукових документів з журналів, книг та довідників, опублікованих видавництвом Springer Nature.

Дослідження охоплювало публікації за останні 5 років (2019-2024) для забезпечення актуальності інформації. Пошук здійснювався за такими ключовими словами та їх комбінаціями: uav path optimization; multi uav path; multi uav task offloading; multi uav cloud; multi uav fire; multi uav ugv. Кожне відібране дослідження було піддано глибокому аналізу. Для кожної статті було створено детальний опис, що включав основні результати, використані методології та ключові висновки. Особлива увага приділялася виділенню ключових слів, які відображали основні концепції, методи та технології, представлені в дослідженні. Для систематизації та ефективного управління зібраною інформацією було використано програму Obsidian. У цьому інструменті для кожного дослідження створювався окремий файл-анотація, що містив короткий опис дослідження, категорії (теги), посилання та іншу інформацію.

Аналіз частоти використання ключових слів дозволив виявити основні тенденції та напрямки досліджень у галузі. У табл. 1 представлено 10 ключових слів, що є найбільш згадуваними. Як видно з таблиці, найбільш актуальними темами досліджень є: застосування хмарних технологій; інтеграція НРЗ у системи

з БПЛА; розробка систем попередження пожеж; застосування нейронних мереж та інших методів машинного навчання.

Таблиця 1 – Ключові слова в публікаціях, що є найбільш згадуваними

Ключове слово	Кількість публікацій
UAV (unmanned aerial vehicle)	44
Multi-UAV	27
Cloud	11
A-star-algorithm	6
Particle-swarm-optimization	6
UGV(unmanned ground vehicle)	6
Fire-prevention	5
Neural-network	4
Review	4
Task-offloading	4

Окремо було проаналізовано популярність різних алгоритмів, що використовуються в дослідженнях БПЛА та НРЗ. Результати цього аналізу представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Алгоритми, що зустрічаються в дослідженнях

Алгоритм	Кількість публікацій
A-star-algorithm	6
Particle-swarm-optimization	6
Genetical-algorithm	3
Ant-colony-optimization	2
Gray-wolf-optimization	2
Bee-colony-algorithm	1
Cuckoo-search-algorithm	1
Floyd-warshall-algorithm	1
Nearest-neighbor-algorithm	1
Voronoi-algorithm	1

Найбільш популярними виявилися: алгоритм A* (A-star); оптимізація методом рою часток (Particle Swarm Optimization); генетичні алгоритми.

Ці алгоритми широко застосовуються для оптимізації маршрутів, планування завдань та вирішення інших складних проблем у сфері БПЛА та НРЗ.

Для кращого розуміння тенденцій у використанні БПЛА було створено діаграму (рис. 1), яка ілюструє співвідношення досліджень, що фокусуються на використанні одиночних БПЛА та груп БПЛА. Як видно з рис. 1, більшість досліджень фокусуються у напрямку використання БПЛА у групах. На рис. 2 наведено основні напрями досліджень, в рамках яких велися розглянуті роботи.

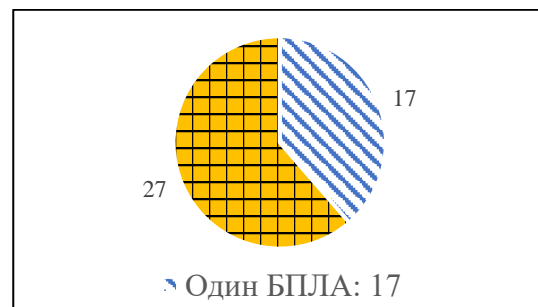


Рис. 1. Способи використання БПЛА (кількість досліджень)

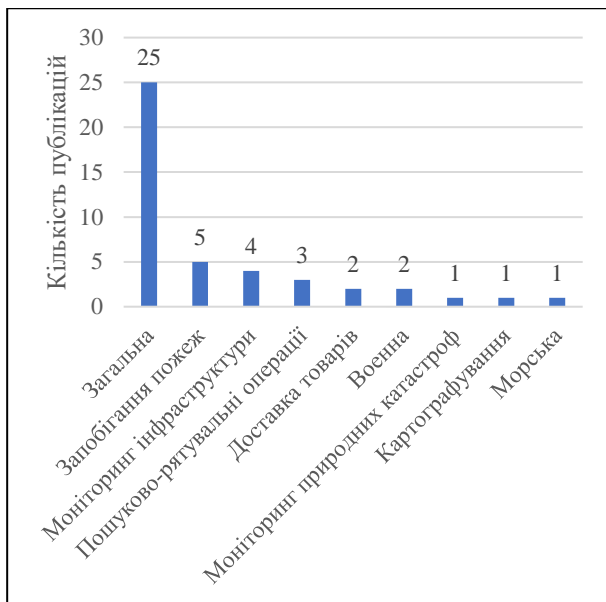


Рис. 2. Поділ досліджень на сфери використання і застосування БПЛА

Більшість розглянутого матеріалу стосується таких загальних питань як оптимізація шляху, часу роботи і розподілу задач для БПЛА. Інші популярні сфери застосування БПЛА та НРЗ це моніторинг та запобігання пожеж, моніторинг інфраструктури та рятувально-пошукові операції.

Для визначення актуальності та сучасності проаналізованих досліджень було проведено аналіз років

публікацій статей. Результати цього аналізу представлені на рис. 3.

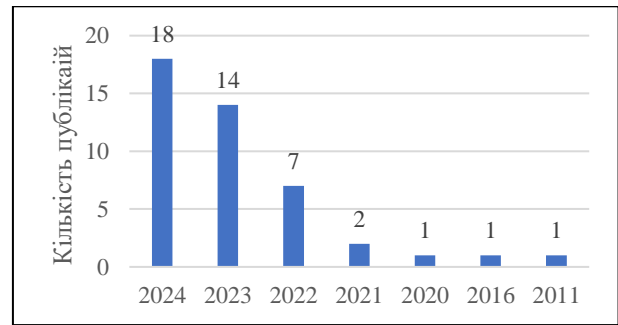


Рис. 3. Розподіл публікацій за роками

Як видно з графіку, переважна більшість проаналізованих статей була опублікована в період 2022-2024 років. Це свідчить про високу актуальність проведеного дослідження та його фокус на найновіших розробках та тенденціях у галузі БПЛА та НРЗ.

Для глибшого розуміння взаємозв'язків між різними дослідженнями та ключовими концепціями було створено граф зв'язків за допомогою програми Obsidian (рис. 4). Це дозволило візуально представити складну мережу взаємозв'язків між різними аспектами досліджень у сфері БПЛА та НРЗ. На створеному графі світлі крапки представляють ключові слова, відображаючи основні концепції та технології. Темні крапки відповідають описам окремих статей, представляючи конкретні дослідження.

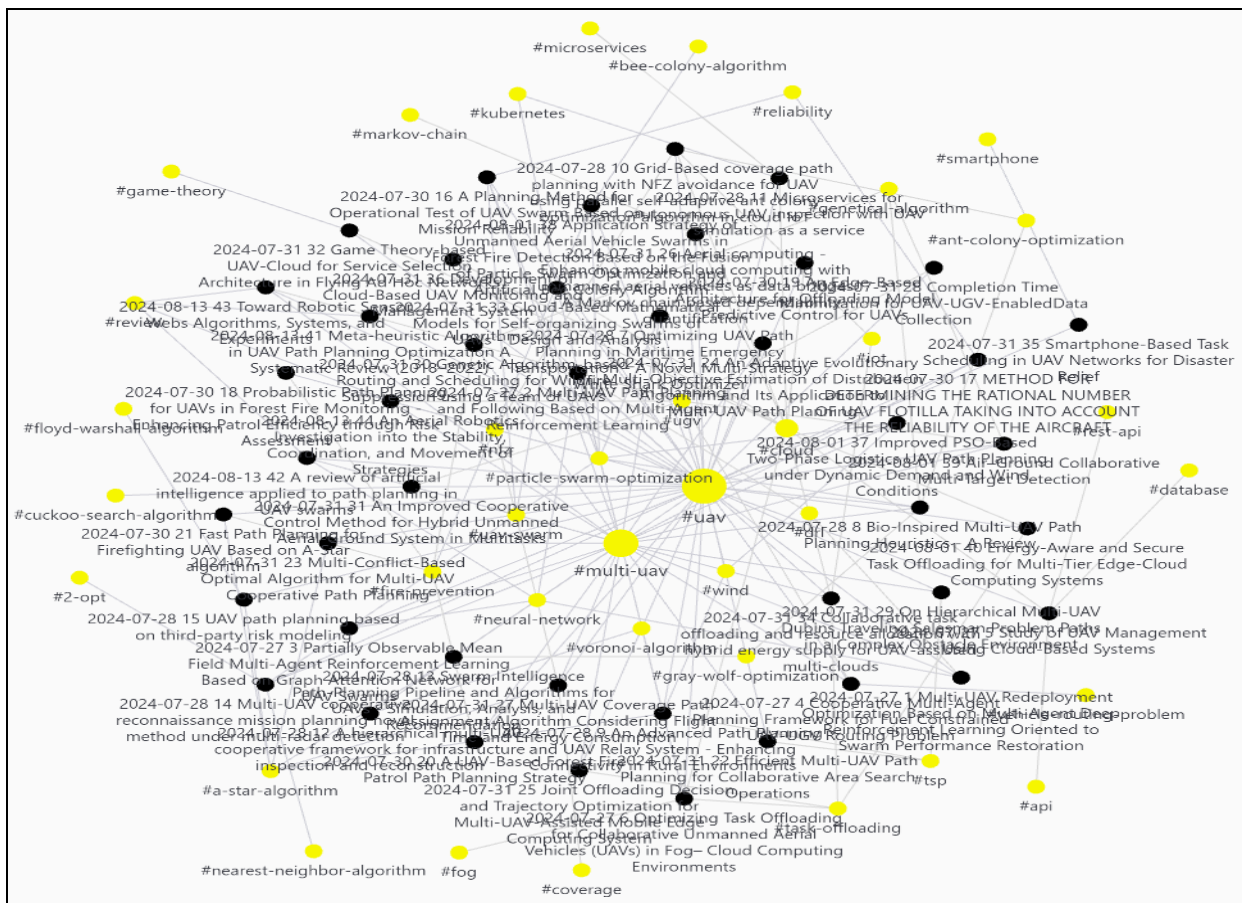


Рис. 4. Граф зв'язків концепцій та посилань

Аналіз графу дозволив виявити найбільш поширені та взаємопов'язані теми досліджень, окрім безпосередньо БПЛА та НРЗ:

- Cloud (хмарні технології): відображає зростаючу роль хмарних обчислень у керуванні та оптимізації роботи безпілотних систем.

- Particle Swarm Optimization (оптимізація роєм частинок): популярний алгоритм для вирішення задач оптимізації, особливо в контексті планування маршрутів та розподілу завдань для груп БПЛА.

- A Star Algorithm (алгоритм A*): широко використовується для ефективного планування шляху та навігації БПЛА та НРЗ у складних середовищах.

- Neural network (нейронні мережі): відображає зростаюче застосування методів машинного навчання для покращення автономності та адаптивності безпілотних систем.

- Task offloading (розподіл задач): ключова концепція для оптимізації роботи груп БПЛА та НРЗ, особливо в контексті обмежених обчислювальних ресурсів окремих пристроїв.

- Genetical algorithm (генетичний алгоритм): ще один популярний метод оптимізації, часто використовуваний для вирішення складних задач планування та розподілу ресурсів у системах БПЛА та НРЗ.

Нижче представлені ключові результати досліджень, представлених в публікаціях, які згруповані по завданням, що розв'язуються, та технологіям, що використовуються.

Оптимізація маршрутів руху. У цій частині розглянуто дослідження, присвячені розробці та вдосконаленню алгоритмів оптимізації траєкторій руху БПЛА. Основну увагу було приділено роботам, які пропонують інноваційні рішення для специфічних сценаріїв застосування безпілотників.

Алгоритм роєвого інтелекту Directional Drive-Rotation Invariant Quadratic Interpolation White Shark Optimization (DD-RQIWSO) для планування траєкторії морського БПЛА представлений у [9]. Він включає кілька стратегій для вдосконалення оригінального алгоритму White Shark Optimizer (WSO). Розроблена модель морського середовища враховує перешкоди та вплив вітру, використовуючи вихрову модель Ламба-Осена. Масштабні експерименти в 2D і 3D віртуальних середовищах порівнюють DD-RQIWSO з чотирма іншими передовими алгоритмами: Spider Wasp Optimizer (SWO), Reptile Search Algorithm (RSA), Autonomous Groups Particle Swarm Optimization (AGPSO) та оригінальним WSO. Результати демонструють перевагу DD-RQIWSO за якістю шляху та стабільністю в різних тестових випадках. Хоча стаття містить детальний аналіз впливу вітру на шлях БПЛА, інші погодні умови, такі як опади, не розглядаються.

Паралельний самоадаптивний алгоритм оптимізації мурашиної колонії (англ. Parallel Self-Adaptive Ant Colony Optimization Algorithm, PSAACO) для планування шляху БПЛА з урахуванням зон, заборонених для польотів (англ. No-Fly Zone, NFZ), запропоновано в [10]. Автори використовують метод на основі сітки для відображення картографічної області та маркування ключових точок, а також представляють динамічний алгоритм Флойда для ефективного уникнення

NFZ. Оцінка підходу проводиться за метриками часу виконання місії та споживання енергії, порівнюючи його з алгоритмами Back-and-Forth, Spiral та Wavefront. Хоча автори згадують доцільність використання хмарних серверів для складних завдань планування шляху, конкретні деталі застосованих хмарних технологій не надаються.

Автори дослідження [11] пропонують комплексний метод планування маршруту БПЛА з урахуванням ризиків та витрат для міських середовищ. Вони розробляють модель ризиків для оцінки небезпек польотів БПЛА у містах, яка включає ризик перешкод, ризик смерті та ризик втрати майна. Дослідники представляють алгоритм Min-cost A* на основі традиційного алгоритму A*. Вони також застосовують вдосконалений алгоритм Флойда для згладжування згенерованого маршруту з низьким ризиком. Ефективність їхнього підходу демонструється за допомогою симуляцій на міській території площею 1 км × 1 км у місті Сіань, Китай, показуючи, що алгоритм Min-cost A* зменшує ризик маршруту на 44,44% порівняно з традиційним алгоритмом A*.

У дослідженні [12] представлено інноваційний алгоритм планування траєкторії польоту БПЛА для реагування на аварії на магістральних нафто- та газопроводах на великих відстанях. Особливість цього підходу полягає в урахуванні помилок позиціонування, що критично важливо для точності операцій. Автори розробили модель, яка оптимізує загальну траєкторію польоту, дотримуючись обмежень на виправлення помилок. Для швидкого планування оптимальної траєкторії використовується модифікований алгоритм A-Star з адаптованою відстанню Ейлера як оціночною функцією вартості. Ефективність методу була продемонстрована через моделювання з використанням реальних даних з конкретної польотної зони. Порівняльний аналіз показав перевагу запропонованого підходу над алгоритмом Дейкстри як з точки зору ефективності, так і часу обчислень, що підкреслює його потенціал для практичного застосування в складних умовах.

Авторами в [13] пропонується новаторський підхід до проведення аварійно-рятувальних операцій з використанням БПЛА та смартфонів. Основна ідея полягає у вирішенні проблеми обмежених ресурсів БПЛА шляхом передачі ресурсоємних завдань з обробки даних на смартфони, які мають більшу обчислювальну потужність. Для оптимізації цього процесу автори розробили багатоцільовий мутаційно-імунний алгоритм кажана (англ. Multi-Objective Mutation-Immune Bat, MOMIB), який є гібридом алгоритму кажана та імунного алгоритму. Цей інноваційний підхід був ретельно протестований в масштабних симуляційних експериментах, які моделювали сценарії катастроф різного ступеня складності. Результати показали значну ефективність запропонованого методу порівняно з традиційними підходами, що відкриває нові перспективи для підвищення ефективності рятувальних операцій з використанням БПЛА в умовах обмежених ресурсів.

Групове застосування. БПЛА також можуть виконувати завдання у групах. В цьому розділі були

розглянуті дослідження, що фокусуються на оптимізації шляхів та задач для декількох БПЛА. Так, наприклад, в дослідженні [14] пропонується використувати групи БПЛА для оптимізації планування ретрансляційних маршрутів в гірській місцевості з метою покращення покриття зв'язку для пошуково-рятувальних операцій. Автори дослідження використовують модель поширення Лонглі-Райса для визначення зон з поганим покриттям сигналу, які потім позначаються як точки інтересу. Автори вирішують задачу комівояжера для оптимізації послідовності відвідування точок інтересу, а потім застосовують алгоритм пошуку A^* для планування маршруту, який враховує висоту місцевості та обмеження покриття. Підхід також враховує такі фактори як енергозбереження та вітростійкість, розраховуючи швидкість БПЛА в залежності від погодних умов для оптимізації часу роботи акумулятора. Але статті бракує детального опису надійності та стійкості системи в різних погодних умовах.

БПЛА також може використовуватися для огляду і реконструкції об'єктів інфраструктури. Розроблена у дослідженні [15] система складається з двох етапів: розвідки та експлуатації, спрямованих на збалансування робочого навантаження і скорочення загального часу виконання завдань. Дослідники впроваджують метод побудови карти щільності, який надає як глобальну, так і локальну інформацію для планування та виконання місії з моніторингу на основі БПЛА у режимі реального часу. Вони також впроваджують динамічний алгоритм на основі діаграми Вороного для рівномірного розподілу завдань між декількома БПЛА. Автори підкріпили свій підхід симуляціями в різних середовищах і тестами в реальних умовах, продемонструвавши покращену часову ефективність і надійність порівняно з існуючими методами. Але автори не розглядають питання оптимізації енергоспоживання і часу автономної роботи БПЛА, що може мати вирішальне значення при виконанні тривалих завдань з моніторингу.

У статті [16] автори досліджують багатоагентне планування маршруту для БПЛА в незнайомому середовищі з невідомими статичними перешкодами. Вони розробили уніфікований підхід для реалізації та аналізу трьох найсучасніших підходів: Multi-Agent Deterministic Policy Gradient (MADPG), Hybrid Simplified Grey Wolf Optimization with Modified Symbiotic Organism Search (HSGWO-MSOS) та покращений алгоритм Artificial Potential Field (APF). Дослідники створили 2D середовище для планування траєкторії БПЛА для моделювання кожного підходу, запустивши 450 симуляцій з різними розмірами рою БПЛА (3, 5 і 10 агентів) у трьох середовищах різної складності. Вони порівнюють продуктивність алгоритмів за показниками успішності, часу виконання та довжини шляху, використовуючи класичний A^* алгоритм як базовий. На основі своїх висновків автори надають рекомендації щодо оптимального використання кожного підходу до планування маршруту БПЛА, враховуючи складність середовища та швидкість доставки вантажу.

Автори дослідження [17] пропонують новий підхід до вирішення проблеми планування розвідуваль-

ної місії множини БПЛА (англ. Multi-UAV Cooperative Reconnaissance Mission Planning, MUCRMP) в контексті виявлення множиною радарів. Дослідники розробили модель оптимізації, спрямовану на мінімізацію відстані шляху БПЛА в межах діапазону виявлення радара, враховуючи такі фактори, як послідовність розвідки, відносне позиціонування щодо цілей та характеристики БПЛА. Автори розробляють покращений синтетичний евристичний алгоритм (англ. improved synthetic heuristic algorithm, ISHA) для вирішення цієї складної задачі, який поєднує алгоритм найближчого сусіда (англ. Nearest Neighbor Algorithm) та метод оптимізації 2-ОПТ. Запропонований метод тестується на задачі з 68 цільовими точками, демонструючи свою дієвість. Порівняно з існуючими алгоритмами, такими як адаптивний генетичний алгоритм (англ. adaptive genetic algorithm), метод рою часток (англ. particle swarm optimization) та оптимізація мурашиними колоніями (англ. ant colony optimization), ISHA показує покращені антирадарні характеристики для БПЛА та швидшу конвергенцію в конкретних розвідувальних місіях. Автори визнають, що вони не враховують того фактору, що параметри місії БПЛА можуть постійно змінюватися залежно від умов навколишнього середовища та часу польоту.

В дослідженні [18] була проведена оцінка та розробка алгоритмів ефективного планування маршрутів і розподілу завдань для декількох БПЛА, що виконують спільні операції з пошуку та моніторингу об'єктів. Вони представляють два основні алгоритми: алгоритм спільного пошуку декількох БПЛА на основі жадібного підходу (MUCS-GD) і алгоритм на основі бінарного пошуку з обмеженнями по споживанню енергії (MUCS-BSAE). Дослідники порівнюють ці алгоритми, використовуючи п'ять різних моделей шляху пошуку: зміїну криву, криву «прямокутного сигналу», криву Пеано, криву Гільберта і криву Мура. Вони проводять симуляції, щоб оцінити ефективність цих алгоритмів і траєкторій пошуку в різних сценаріях, враховуючи такі фактори, як споживання енергії, швидкість польоту і розмір території. Результати показують, що алгоритм MUCS-BSAE перевершує алгоритм MUCS-GD, покращуючи ефективність на 25,8%. Крім того, автори пропонують покращену версію MUCS-BSAE (IMUCS-BSAE) спеціально для кривої траєкторії «прямокутного сигналу», що додатково підвищує ефективність на 2%.

Алгоритм багатоконфліктного пошуку (MCBS) для спільного планування маршрутів декількох БПЛА у складних умовах, описаний в [19], враховує просторові та часові обмеження, включаючи обмеження польоту, вплив навколишнього середовища та вимоги до взаємодії між БПЛА. Розроблена тривимірна модель середовища включає географічну інформацію та різні типи загроз. MCBS використовує ієрархічний підхід з алгоритмом A^* для планування індивідуальних маршрутів та високорівневою системою вирішення конфліктів для взаємодії БПЛА. Алгоритм запроваджує пріоритетну обробку конфліктів, модифікований метод росту дерева обмежень та нову евристичну функцію. Результати досліджень підтвердили ефективність алгоритму в пошуку оптимальних безпечних маршрутів.

Адаптивний еволюційний багатоцільовий алгоритм оцінки розподілу (АЕМО-EDA), представлений в [20], вирішує проблему спільного планування маршрутів декількох БПЛА. Алгоритм був протестований на еталонних задачах (DTLZ і WFG) та порівняний з іншими сучасними алгоритмами, такими як NSGA-III, RVEA і NSGAIII-GBFE. Моделювання сценаріїв планування траєкторії польоту декількох БПЛА продемонструвало ефективність підходу в уникненні загроз і одночасній оптимізації декількох задач.

Дослідження [21] пропонує метод оптимізації для спільного прийняття рішень щодо розподілу навантаження та планування траєкторії в системі мобільних периферійних обчислень (англ. Mobile Edge Computing, MEC) з декількома БПЛА. Задача сформульована як мінімізація суми затримок та споживання енергії з урахуванням обмежень на область польоту БПЛА, уникнення зіткнень та обчислювальну потужність. Для оптимізації траєкторій БПЛА розроблено алгоритм Simulated Annealing-Beetle Antennae Search (SA-BAS), який поєднує методи Simulated Annealing і Beetle Antennae Search. Численні симуляції підтвердили ефективність запропонованої схеми в мінімізації затримки та енергоспоживання порівняно з іншими алгоритмами.

Проблема планування покриття для декількох БПЛА у складних умовах із забороненими для польотів зонами розглядається в [22]. Запропоновано два алгоритми: MBS-MUCCPPAFOA (Multi-base station Multi-UAV Cooperative Coverage Path Planning Algorithm with Flexible Obstacle Avoidance Ability) та MUAV-CCPPAFOA-AS (Multi-UAV Cooperative Coverage Path Planning Algorithm with Flexible Obstacle Avoidance Capability based on Area Segmentation), спрямовані на підвищення ефективності та енергоспоживання роїв БПЛА при виконанні завдань з покриття території. Алгоритм A* використовується для обходу перешкод. Імітаційні експерименти порівнюють запропоновані алгоритми з базовим алгоритмом планування покриття при різних розмірах робочої зони і складності навколишнього середовища. Однак, не розглядаються потенційні обмеження алгоритмів у реальних сценаріях та питання обмеження зв'язку між БПЛА і базовими станціями.

Рішення ієрархічної задачі комівояжера Дубіна (англ. hierarchical multi-UAV Dubins traveling salesman problem, HMDTSP) в складному тривимірному середовищі з перешкодами представлено в [23]. Автори розробили алгоритм багатопроєкційної кластеризації з декількома БПЛА (англ. multi-UAV multilayer projection clustering, MMPC) для ефективної кластеризації терміналів зв'язку. Імітаційні експерименти підтверджують ефективність запропонованих стратегій у наданні реалістичних варіантів рішень для HMDTSP в складних середовищах з перешкодами.

Дослідження [24] фокусується на проблемі планування маршрутів БПЛА з врахуванням впливу вітру в інтелектуальних транспортних системах. Розроблена двофазна система планування маршрутів БПЛА включає розподіл часу, оновлення списку клієнтів і аналіз динаміки попиту. Вдосконалений алгоритм планування маршрутів на основі оптимізації

рою частинок (PSO) використовується для вирішення поставленої задачі. Масштабне чисельне моделювання з використанням модифікованого набору даних Solomon R201 продемонструвало покращення ефективності доставки вантажу та використання акумулятора БПЛА. Проте, у дослідженні відсутні порівняння запропонованого алгоритму з іншими алгоритмами планування маршрутів.

БПЛА також можуть використовуватися у групах з НРЗ. Дослідження [25] зосереджено на оптимізації маршрутів обох видів транспортних засобів для максимальної ефективності з урахуванням обмежень, таких як ємність акумулятора БПЛА та швидкість БНЗТ. Автори пропонують послідовну багатоагентну схему планування, що використовує мінімальне покриття множини (англ. Minimum Set Cover) для розподілу завдань та підхід на основі обчислювальної математики для вирішення задачі маршрутизації транспортних засобів з обмеженням енергії та часовими вікнами (англ. E-VRPTW). Ефективність схеми оцінюється за допомогою симуляцій в різних сценаріях, демонструючи потенційні переваги співпраці БПЛА та НРЗ з точки зору часу виконання завдання та споживання енергії. Однак, у статті не наведено достатньо інформації щодо обчислення надійності системи а також способів та методів комунікації між БПЛА та НРЗ.

У дослідженні [26] представлена система збору даних за допомогою БПЛА для бездротових сенсорних мереж, спрямована на мінімізацію часу виконання місії. Запропоновано дві стратегії співпраці: без інформаційної взаємодії та з нею. Проблема визначена як спільна оптимізація маршрутів БПЛА та НРЗ, об'єднання сенсорних вузлів та вибір стратегії з урахуванням обмежень енергоспоживання та висоти польоту. Розроблено багатапний алгоритм оптимізації, що поєднує методи опуклої оптимізації та генетичні алгоритми. Симуляції демонструють значне покращення часу завершення місії та енергоефективності порівняно з еталонними схемами. Однак дослідження недостатньо враховує реальні фактори навколишнього середовища, такі як перешкоди або погодні умови.

У статті [27] автори пропонують метод спільного управління складними багатозадачними процесами з використанням гібридної системи БПЛА/НРЗ у середовищі з великою площею. Підхід спрямований на мінімізацію витрат часу та енергії при виконанні поставлених завдань. Автори поділяють проблему на три етапи: визначення оптимального розташування ретрансляційних станцій для НРЗ за допомогою методу адаптивної кластеризації, розв'язання задачі планування траєкторії руху НРЗ за допомогою вдосконаленого алгоритму зозулі (англ. cuckoo search algorithm) та розподіл завдань між БПЛА за допомогою методу групування, що базується на вдосконаленому алгоритмі динамічного програмування. Метод протестовано за допомогою симуляцій простих і складних кооперативних завдань, що демонструє його ефективність у різних сценаріях. Автори також обговорюють ключові параметри та порівнюють свій підхід до розподілу завдань з оптимізацією рою частинок та жадібними методами, демонструючи кращі

показники з точки зору споживання енергії та часу виконання завдань.

Модель спільного повітряно-наземного виявлення декількох цілей на основі змішаного цілочисельного лінійного програмування (англ. Mixed Integer Linear Program, MILP) для координації БПЛА і НРЗ описана в дослідженні [28]. Вона включає в себе динамічне уникнення зіткнень, розподіл завдань та обмеження на об'їзд перешкод для симуляції реальних сценаріїв. Дослідники створили комплексну систему, яка враховує витрати часу, споживання енергії та плавність траєкторії. Для вирішення цієї складної оптимізаційної задачі вони представили новий метод, що поєднує алгоритм гілок і меж з покращеним генетичним алгоритмом (англ. Branch-and-Bound algorithm with an Improved Genetic Algorithm, IGA-V&B). Запропонований підхід перевірено за допомогою симуляцій у багатоагентному середовищі з багатьма перешкодами та додатково протестовано в реальних умовах. Результати показують, що метод IGA-V&B скорочує час обчислень на 30% порівняно з традиційним методом гілок і меж, зберігаючи при цьому якість рішення.

Нейронні мережі. Для оптимізації роботи групи БПЛА можуть бути використані нейронні мережі. У статті [29] розглядається проблема забезпечення надійності рою БПЛА, які виконують завдання з картографування місцевості. Під час виконання місії рій може втрачати БПЛА через фізичні пошкодження або вичерпання енергії, що зменшує покриття території. Для вирішення цієї проблеми автори пропонують новий метод, заснований на багатоагентному навчанні з підкріпленням (англ. Multi-Agent Deep Reinforcement Learning, MADRL). Кожен БПЛА розглядається як окремий агент, що приймає рішення на основі інформації про стан навколишнього середовища та інших агентів. Використання MADRL дозволяє рою навчатися оптимально розподіляти завдання між діючими БПЛА навіть в умовах втрат, що мінімізує зниження ефективності місії.

У дослідженні [30] пропонується новий підхід до планування маршрутів у багатоагентних системах. У ньому використовується глибоке навчання з підкріпленням (англ. Deep Reinforcement Learning) для забезпечення навігаційних можливостей БПЛА в складних середовищах на основі даних лазерного сканування. Ключовим нововведенням є інтеграція методу планування маршруту на основі вибірки, що підвищує ефективність. Запропонований метод також включає обмін параметрами між БПЛА для прискорення навчання та покращення продуктивності. Для вирішення проблем поведінки БПЛА введена ретельно розроблена функція винагороди.

У науковій статті [31] представлено інноваційний підхід до координації декількох БПЛА в умовах обмеженого зв'язку. Автори розробили новий алгоритм GPMF (англ. Graph attention network supported Partially observable Mean Field Multi-agent reinforcement learning), який об'єднує графові нейронні мережі та теорію середнього поля. Цей підхід ефективно враховує складні взаємодії між БПЛА та забезпечує ефективне прийняття рішень. Результати

експериментів показують перевагу GPMF над існуючими методами у складних кооперативних завданнях. Хоча стаття зосереджена на покращенні спільного прийняття рішень між БПЛА в умовах обмеженого діапазону зв'язку, вона не містить чітких стратегій для ситуацій повної втрати зв'язку або несправності БПЛА.

Хмарні технології. У цьому розділі було розглянуто дослідження, що фокусуються на використанні БПЛА та БТНЗ з хмарними технологіями. Основними напрямками досліджень є перенесення обчислювально важких завдань на хмарні сервери, що забезпечує підвищення ефективності місії.

Інтеграція БПЛА з технологією хмарних обчислень для створення більш ефективної та масштабованої системи для застосувань БПЛА є ключовою темою статті [32]. Автори пропонують структуру, яка використовує Ресурсно-орієнтовану архітектуру (ROA) та веб-сервіси на основі передачі репрезентативного стану (REST) для забезпечення універсального доступу до ресурсів і послуг БПЛА. Запропонована система включає брокерський рівень, який керує розподілом завдань відповідним БПЛА, забезпечуючи відокремлення клієнта від постачальників послуг. У статті детально описано реалізацію цієї структури, включаючи розробку ресурсів API та бази даних для зберігання інформації про БПЛА. Хоча автори оцінюють час відгуку системи та порівнюють її з традиційними методами однорангового RF-зв'язку, стаття має деякі недоліки. Зокрема, відсутність реального впровадження хмарної системи або детального концепту, а також бракує розрахунків надійності системи, комплексного аналізу продуктивності та енергоефективності БПЛА, що є важливими для підтвердження практичної життєздатності запропонованої концепції.

У статті [33] автори пропонують спільну стратегію розподілу (англ. collaborative offloading strategy) для застосувань БПЛА, яка використовує можливості туманої (англ. fog) та хмарної (англ. cloud) обчислювальних систем. Стратегія спрямована на мінімізацію затримок в комунікації та зменшення енергоспоживання безпілотників шляхом оптимізації розподілу обчислювальних ресурсів для кожного БПЛА. Результати дослідження показують, що їхній підхід може значно знизити затримку комунікації та загальне енергоспоживання вузлів системи порівняно з альтернативними стратегіями. Однак в статті відсутній аналіз надійності, який має вирішальне значення для застосування БПЛА в критичних сценаріях, і вона передбачає ідеальний зв'язок без урахування потенційних збоїв в комунікації між БПЛА, туманними вузлами і хмарними серверами.

Розробка та реалізація хмарної системи для автономної інспекції об'єктів інфраструктури за допомогою БПЛА розглядаються в статті [34]. У цій роботі автори представили додаток із мікросервісною архітектурою для високорівневого планування, моніторингу та тестування місії БПЛА, таких як перевірка ліній електропередач, веж, мостів та залізниць. Система використовує контейнеризацію та Kubernetes для розгортання, масштабування та управління,

з безперервною інтеграцією та розгортанням (англ. continuous integration and continuous deployment, CI/CD) через сервіс GitLab. Автори реалізували різні сервіси, включаючи веб-інтерфейс, оптимізатор маршрутів і симулятор БПЛА, щоб забезпечити планування місії, розрахунок маршрутів і моніторинг в реальному часі. Проведена оцінка продуктивності показала здатність системи справлятися зі зростаючим користувацьким навантаженням та підтримувати низький час відгуку завдяки масштабуванню сервісів. У подальшому розвитку системи автори планують створити окремий сервіс для визначення впливу погодних умов на маршрути БПЛА.

Метод планування автономних місій БПЛА, який передбачає перенесення обчислювально важких завдань на периферійні сервери, запропоновано в дослідженні [35]. Автори реалізували Model Predictive Controller (MPC) для керування траєкторією дрона Crazyflie, який має обмежені бортові обчислювальні можливості. Архітектура системи базується на Kubernetes, що забезпечує організацію розгортання контейнерних додатків, включаючи MPC та головну операційну систему ROS (Robot Operating System). У ході експериментів дослідники аналізували продуктивність системи при різних параметрах і швидкостях MPC, вимірюючи точність траєкторії, затримки в проходженні маршруту та загальну поведінку системи. Результати демонструють, що запропонована система здатна ефективно керувати БПЛА, коли високорівневий контролер руху працює на периферійному сервері, що відкриває можливість виконання більш складних автономних місій для БПЛА з обмеженими ресурсами.

Робота [36] представляє новий підхід до оцінки доступності та надійності систем мобільних хмарних обчислень (англ. Mobile Cloud Computing, MCC) з використанням БПЛА для повітряних обчислень. Автори розробили моделі безперервного часового марковського ланцюга (англ. Continuous Time Markov Chain, CTMC) для опису архітектури системи, що складається з мобільних пристроїв, БПЛА, базових станцій і хмарних серверів. У дослідженні представлено базову модель та дві розширені моделі, які включають стратегії гарячого і холодного резервування для підвищення надійності системи. Проведений аналіз показав, що розширені моделі значно підвищують доступність системи: модель гарячого резервування забезпечує 99,97% доступності і скорочує час простою на 62 години порівняно з базовою моделлю.

У статті [37] розглядається архітектура вибору послуг у БПЛА-хмарі на основі теорії ігор (англ. Game Theory-based UAV-cloud of Service Selection Architecture, GT-SSA), яка вирішує питання управління ресурсами та вибору послуг у хмарних середовищах для БПЛА. Запропонована архітектура використовує принципи теорії ігор для оптимізації прийняття рішень дронами-клієнтами (англ. Client Drones, CD) та дронами-провайдером (англ. Provider Drones, PD), що підвищує ефективність вибору послуг у рамках Flying Ad hoc NETworks (FANETs). Для моделювання поведінки та комунікацій дронів автори реалізували GT-SSA за допомогою симулятора OMNeT++

4.6 та фреймворків INET і AVENS. Оцінка продуктивності архітектури проводилась за такими показниками, як затримка виявлення, затримка споживання, наскрізна затримка та споживання енергії, при цьому GT-SSA показала кращі результати порівняно з існуючими підходами, такими як GTCS.

У статті [38] автори презентують інноваційний підхід до вирішення проблем координації та управління роями БПЛА. Автори використовують математичну модель для керування рухом рою БПЛА та покращення захоплення зображень на напіввипадковій траєкторії польоту. У статті пропонується хмарна модель, яка використовує передові методи і алгоритми для розробки відмовостійких схем і побудови децентралізованого рою БПЛА. Для реалізації поставленої задачі вони використовують OpenStack та Kubernetes, що забезпечує надійну та ефективну продуктивність. Створена система також включає в себе OpenDroneMap для обробки аерофотознімків і використовує БПЛА, оснащені Raspberry Pi для збору даних. Запропоноване рішення є модульним і може бути адаптоване до різних сфер застосування.

У дослідженні [39] увага зосереджена на проблемі спільного розподілу завдань і ресурсів у мультимарній обчислювальній системі з використанням БПЛА для пристроїв Інтернету речей (англ. Internet of Things, IoT). Автори формулюють динамічну оптимізаційну задачу, спрямовану на мінімізацію енергоспоживання БПЛА при збереженні стабільності черги, враховуючи витрати на передачу даних і виконання завдань. Запропоновано алгоритм спільного розвантаження завдань і розподілу ресурсів (англ. Collaborative Task Offloading and Resources Allocation Algorithm, CTORAA), заснований на методах штучного інтелекту, що дозволяє ефективно вирішувати завдання розвантаження та збору енергії. Імітаційні експерименти підтвердили ефективність алгоритму, порівнюючи його з іншими підходами.

Авторами дослідження [40] було презентовано систему UAV Flight Tracker – хмарну систему для моніторингу та управління кількома БПЛА в режимі реального часу. Використання архітектури MEAN (MongoDB, ExpressJS, AngularJS та NodeJS) забезпечує масштабованість та ефективне відстеження, уникнення зіткнень і управління траєкторіями польоту. Алгоритм уникнення зіткнень реалізовано у трьох зонах: безпечна, перенаправлення та аварійна. Продуктивність системи оцінюється за такими параметрами, як час відгуку, використання ресурсів і ефективність уникнення зіткнень. Під час симуляцій з до 100 БПЛА аналізуються різні показники, включаючи час оновлення даних з датчиків і завершення місії. Результати підтверджують здатність системи до масштабування та ефективність в управлінні кількома БПЛА одночасно. Проте, бракує аналізу надійності та відмовостійкості системи, а також тестувань у реальних умовах з урахуванням впливу навколишнього середовища, таких як погодні умови.

У статті [41] автори пропонують енергоефективну і безпечну систему розподілу завдань для декількох БПЛА за допомогою периферійних хмарних обчислень (англ. Edge-Cloud Computing, ECC). Вони

формулюють оптимізаційну задачу, яка включає розподіл завдань і ресурсів, стиснення і забезпечення безпеки для мінімізації загального енергоспоживання в умовах обмежень на час затримки. Автори проводять оцінку своєї моделі за допомогою симуляцій в MATLAB, порівнюючи її з локальними, периферійними та хмарними стратегіями виконання, а також з іншими існуючими моделями розподілу завдань. Результати демонструють, що запропонована ними модель забезпечує значну економію енергії порівняно з еталонними рішеннями, з покращеннями від 12% до 21%.

Надійне виконання завдань. Щодо розрахунків надійності місії з використанням БПЛА було знайдено не так багато статей. У роботі [42] автори пропонують метод планування завдань для роїв БПЛА, орієнтований на забезпечення надійності виконання поставлених місій. Створено модель надійності для роїв, що виконують розвідувальні та бойові завдання, з урахуванням висоти польоту, площі покриття та загроз від противника. Для моделювання та розрахунку надійності місії на різних етапах – запуску, польоту та бойових дій – автори застосовують блок-схеми надійності, дерева відмов і двійкові діаграми прийняття рішень (англ. Binary Decision Diagrams, BDD). Оптимізація планів випробувань здійснюється за допомогою алгоритму багатоцільової оптимізації рою квантових частинок (англ. Multi-Objective Quantum Particle Swarm Optimization, MOQPSO), який враховує надійність і вартість місії. Метод демонструється на прикладі рою з розвідувальними і бойовими можливостями, підкреслюючи, як оптимальні плани польоту можуть бути обрані залежно від сценаріїв з відомим і невідомим місцезнаходженням ворожих цілей.

У дослідженні [43] запропоновано метод визначення оптимальної чисельності флотилій БПЛА, враховуючи надійність літальних апаратів і необхідну якість моніторингу у надзвичайних ситуаціях. Аналізуючи фактори, що впливають на структуру угруповання, автори встановили залежність ефективності виконання завдань від ймовірності відмови БПЛА під впливом негативних факторів. Використано теорію ризику, ймовірностей, комбінаторику, теорію надійності та методи математичної оптимізації для розробки моделі. Представлено структурну схему управління флотиліями БПЛА, яка враховує можливість самовідновлення системи в умовах деградації під впливом дестабілізуючих факторів та загроз. Крім того, розроблено математичну модель для оцінки якості управління угрупованням і сформульовано оптимізаційну задачу для максимізації продуктивності системи за наявності заданих обмежень. Однак у роботі бракує інформації щодо практичної реалізації та обмежень запропонованого методу.

Запобігання лісовим пожежам. Використання БПЛА та НРЗ у групах для запобігання лісовим пожежам є одним із найбільш розповсюджених напрямків сучасних досліджень. БПЛА та НРЗ можуть використовуватися для задач з моніторингу місцевості для запобігання подальшому розповсюдженню пожежі.

У статті [44] автори представляють алгоритм Probabilistic Path Planning (PPP) для БПЛА для покращення моніторингу та запобігання лісовим пожежам. Алгоритм поєднує інформацію про ймовірність виникнення пожежі в реальному часі з динамічним програмуванням для оптимізації маршрутів патрулювання БПЛА. Дослідники використовують логістичну регресію для розрахунку ймовірності пожежі на основі таких факторів навколишнього середовища, як температура, рівень вологості повітря і кількість опадів. Потім вони застосовують механізм фільтрації для видалення точок з низьким рівнем ризику і використовують метод динамічного програмування для створення оптимального маршруту патрулювання з урахуванням відстані та ймовірності пожежі. Ефективність алгоритму PPP оцінюється за допомогою симуляцій, порівнюючи його з традиційними методами, які враховують лише відстань. Результати показують, що запропонований метод скорочує час патрулювання на 18,5% та площу поширення пожежі на 23% порівняно з традиційними підходами. Хоча дослідження представляє новий підхід до моніторингу лісових пожеж за допомогою БПЛА, йому бракує аналізу надійності системи. Крім того, автори могли б дослідити потенційну інтеграцію методів машинного навчання для подальшого підвищення точності прогнозування пожеж.

Автори дослідження [45] пропонують метод планування маршрутів польотів БПЛА для моніторингу лісових пожеж з використанням карти ризиків лісових пожеж. Вони представляють підхід, заснований на визначенні маршруту патрулювання з урахуванням ризиків (RSUPP), який поєднує відстань, придатність для роботи на великих площах та інформацію про пожежну небезпеку для оптимізації маршрутів патрулювання БПЛА. Метод використовує алгоритм Gaussian mixture clustering для поділу великих територій на менші підзони, а потім використовує алгоритм Ring Self-Organizing Map (RSOM) для планування ефективних маршрутів польоту в межах кожної підзони. Автори також представляють схему кооперації декількох БПЛА для подолання обмежень патрулювання одним БПЛА великих лісових масивів. Вони оцінюють свій підхід у порівнянні з методами випадкового пошуку і локального пошуку, використовуючи практичний набір даних, демонструючи покращене покриття зон підвищеного ризику і скорочення загальної відстані польоту. Стаття включає дослідження національного лісового парку в Китаї, щоб проілюструвати застосування запропонованого ними методу. Але на жаль автори не розглядають потенційні обмеження, такі як вплив погодних умов на продуктивність БПЛА або інтеграцію оновлень даних в реальному часі в процес планування маршруту.

Для забезпечення швидкого реагування на лісові пожежі в статті [46] розроблено генетичний алгоритм маршрутизації та планування з часовими обмеженнями (англ. Genetic Algorithm-based Routing and Scheduling with Time constraints, GARST) із залученням групи БПЛА. Формулювання проблеми зводиться до задачі найкоротшого маршруту з часовими обмеженнями, що має на меті мінімізувати загальний

час ліквідації пожежі, забезпечуючи при цьому, що всі осередки пожежі будуть оброблені як окремі завдання для БПЛА (англ. Single UAV Tasks, SUTs). Алгоритм використовує генетичні оператори, такі як селекція, кросингвер, мутація та елітизм, для пошуку оптимальних або близьких до оптимальних рішень. Ефективність GARST підтверджена симуляціями з різною кількістю пожеж та аналізом методом Монте-Карло, показуючи високу успішність у сценаріях, де кількість випадків пожеж у 5 разів перевищує кількість БПЛА. Запропонований підхід перспективний для зменшення площі знищеної території та забезпечення швидкої ліквідації лісових пожеж. Проте, у роботі не проведено аналіз факторів навколишнього середовища, таких як швидкість та напрям вітру або рельєф, які можуть суттєво вплинути на продуктивність БПЛА в реальних умовах.

У статті [47] автори запропонували систематичну стратегію використання роїв БПЛА для виявлення та боротьби з лісовими пожежами. Розроблений підхід охоплює повний цикл — від виявлення осередків пожежі до аналізу та впровадження заходів контролю, базуючись на поєднанні алгоритмів оптимізації рою частинок (PSO) та штучної бджолиної колонії (англ. artificial bee colony, ABC). У тривимірному середовищі було змодельовано різноманітні сценарії лісових пожеж, враховуючи різні висоти гір, місця загоряння та площі пожежі. Алгоритм PSO використовується для ефективного планування маршрутів БПЛА з метою швидкого виявлення кількох точок загоряння, тоді як алгоритм ABC оцінює інтенсивність пожежі та пропонує відповідні заходи боротьби. Симуляції підтверджують ефективність підходу, демонструючи, як рої БПЛА можуть ефективно орієнтуватися на складній місцевості, виявляти декілька осередків пожежі та оцінювати їхню інтенсивність.

Результати аналізу публікацій. В ході аналізу 44 публікацій, які досліджують питання застосування БПЛА, встановлено, що лише у роботах [42] та [43] детально розглядаються питання надійності місії залежно від кількості БПЛА та інших важливих факторів. При цьому питання впливу вітру на траєкторії польоту БПЛА висвітлюється лише у дослідженнях [9], [14] та [24]. На жаль, дослідження впливу інших погодних умов, таких як дощ чи туман, не представлено в жодній з проаналізованих публікацій. Однак ці аспекти є критично важливими для пошуково-рятувальних операцій, де точність навігації та надійність місії мають ключове значення.

Більшість досліджень зосереджені на вдосконаленні алгоритмів оптимізації, таких як A*, PSO та генетичні алгоритми [4], [5], що дозволяє підвищити точність та ефективність планування маршрутів для БПЛА. Ці алгоритми активно використовуються для розв'язання задач оптимізації траєкторій польоту, забезпечуючи більш ефективне управління ресурсами і зменшення витрат часу на виконання завдань.

Нейронні мережі також демонструють значний потенціал у покращенні навігації БПЛА, завдяки їхній здатності до адаптивного навчання і прогнозування, як показано у дослідженні [30].

Аналіз показав, що більшість робіт акцентують на обмежених обчислювальних можливостях БПЛА та можливості перенесення частини функцій оптимізації шляхів до хмарних серверів [32], [33], [35]. Використання хмарних технологій дозволяє не лише поліпшити обробку погодних умов, завдяки інтеграції з сервісами погоди для корекції траєкторій польоту БПЛА [34], але і здійснити детальніший розрахунок надійності місії. Хмарні платформи здатні обробляти великі обсяги даних та виконувати складні обчислення, що є критично важливим для ефективного управління роями БПЛА в реальному часі. Це відкриває нові можливості для підвищення точності та надійності місії БПЛА, а також для адаптації до змінюваних умов навколишнього середовища.

Визначення напрямів подальших досліджень. У контексті стрімкого розвитку технологій БПЛА та мультиагентних систем постає потреба у вдосконаленні методів оптимізації розрахунків маршрутів і розподілу завдань. Ключовим напрямом майбутніх досліджень є інтеграція хмарних технологій та вдосконалених алгоритмів для підвищення ефективності планування і виконання місії БПЛА.

Одним з перспективних векторів розвитку є створення систем для оптимізації розрахунку шляхів у мультиагентних системах з урахуванням динамічних зовнішніх факторів, зокрема вітру та інших метеорологічних умов. Розробка адаптивних алгоритмів, здатних враховувати зміни погодних умов у реальному часі, набуває критичного значення. Це передбачає інтеграцію метеорологічних прогнозів та актуальних даних про атмосферні умови для оперативного коригування траєкторій польоту БПЛА.

Важливим аспектом є дослідження надійності місії у мультиагентних системах. Розробка моделей оцінки надійності, які враховують як технічні характеристики БПЛА, так і зовнішні фактори, дозволить забезпечити більш точне планування місії і мінімізувати ризик відмов. Це включає розрахунок надійності на різних етапах місії – від запуску до виконання завдань – з урахуванням потенційних збоїв у системах управління та комунікації.

Подальші дослідження можуть охоплювати аналіз сучасних хмарних технологій та платформ, таких як Azure, GCP, AWS, та можливості їх інтеграції з системами БПЛА.

На рис. 5 представлено схему взаємодії незалежних агентів. Кожен агент може бути фізичним НРЗ або БПЛА, оснащеним власним програмним забезпеченням (ПЗ). Це ПЗ дозволяє агентам оптимізувати свій маршрут та завдання залежно від стану середовища та інших агентів. Кількість агентів може варіюватися. Обмін інформацією між агентами на схемі позначено стрілочками. Перевагою цього підходу є автономність системи, що особливо цінним в умовах відсутності зв'язку.

Однак це збільшує обчислювальне навантаження на агентів, що підвищує вартість кожного БПЛА або НРЗ та енергоспоживання.

Рис. 6 ілюструє схему взаємодії агентів з використанням хмарних технологій. Агенти (фізичні елементи системи, БПЛА та НРЗ) комунікують з хмар-

ною системою через балансувач навантаження (Load balancer). Його функція – оптимальний розподіл навантаження і запитів від агентів між множиною копій ПЗ. Ці копії ПЗ зазвичай розгортаються у контейнерах за допомогою таких інструментів, як Docker та Kubernetes [48]. Кількість агентів і копій ПЗ може бути різною, а балансувач навантаження здатний динамічно змінювати кількість контейнерів ПЗ. Схема також відображає взаємодію ПЗ з базою даних (БД) та зовнішнім сервісом погоди.

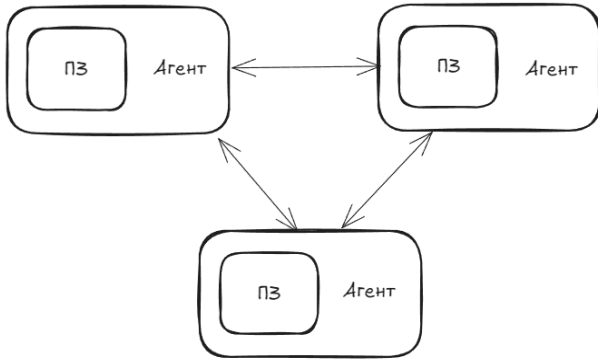


Рис. 5. Схема взаємодії незалежних агентів

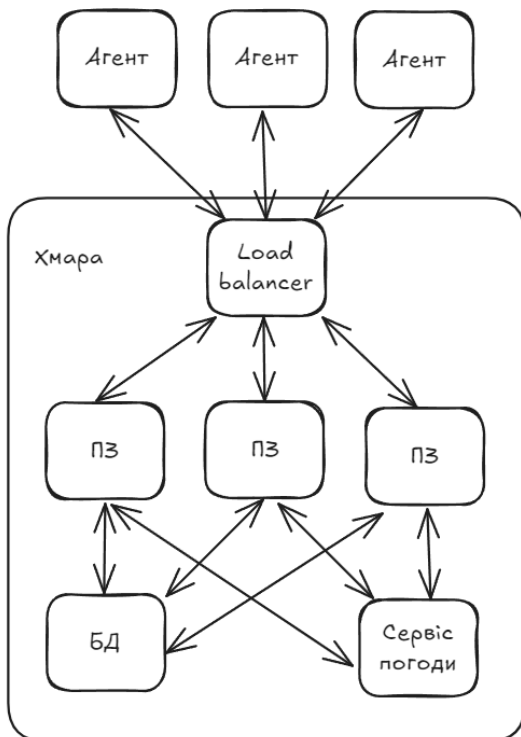


Рис. 6. Запропонована схема взаємодії агентів з хмарним середовищем

Перевагою такого підходу є перенесення обчислень у хмарне середовище, що знижує вартість експлуатації агентів. Недоліком може бути вразливість до перебоїв або повної втрати зв'язку з хмарним середовищем.

Проте це не виключає можливості комбінування даного підходу з попереднім для досягнення оптимального балансу між автономністю та ефективністю.

Висновки

У ході дослідження було проаналізовано 44 наукові публікації за період з 2019 по 2024 роки, присвячені оптимізації роботи безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та безпілотних наземних транспортних засобів (НРЗ) з використанням хмарних технологій. Цей аналіз дозволив виконати поставлені завдання та досягти мети дослідження, а саме: провести порівняльний аналіз актуальних способів використання БПЛА та НРЗ, визначити найбільш популярні напрями досліджень та алгоритми оптимізації, а також обґрунтувати доцільність застосування хмарних технологій для оптимізації їх роботи.

Результати дослідження показали, що найбільш актуальними темами в галузі БПЛА та НРЗ є застосування хмарних технологій, інтеграція НРЗ у системи з БПЛА, розробка систем попередження пожеж та застосування методів машинного навчання. Серед алгоритмів оптимізації найбільшу популярність мають A^* , оптимізація методом рою часток та генетичні алгоритми. Ці методи активно використовуються для вирішення складних задач планування маршрутів та розподілу завдань у групах БПЛА та НРЗ.

Важливим висновком є те, що використання хмарних технологій відкриває нові можливості для підвищення ефективності роботи БПЛА та НРЗ. Хмарні платформи дозволяють перенести ресурсоємні обчислення на віддалені сервери, що значно розширює можливості оптимізації маршрутів та розподілу завдань. Це особливо актуально в контексті обмежених обчислювальних ресурсів самих пристроїв. Крім того, інтеграція з хмарними сервісами погоди дозволяє враховувати метеорологічні умови при плануванні місій, що підвищує їх надійність та ефективність.

Однак, дослідження виявило і певні прогалини в існуючих роботах. Зокрема, недостатньо уваги приділяється впливу різноманітних погодних умов на роботу БПЛА та НРЗ, а також детальному розрахунку надійності місій. Ці аспекти є критично важливими для практичного застосування безпілотних систем, особливо в складних умовах та при виконанні відповідальних завдань.

Тому подальші дослідження мають зосередитися на розробці адаптивних алгоритмів, здатних враховувати динамічні зміни навколишнього середовища, та на створенні комплексних моделей оцінки надійності місій з урахуванням як технічних характеристик пристроїв, так і зовнішніх факторів. Запропоновано схема системи для оптимізації завдань мультиагентних систем з використанням хмарних технологій, балансувача навантаження та стороннього сервісу погоди.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sun, Y., Fesenko, H., Kharchenko, V., Zhong, L., Kliushnikov, I., Illiashenko, O., Sachenko, A. UAV and IoT-Based Systems for the Monitoring of Industrial Facilities Using Digital Twins: Methodology, Reliability Models, and Application. *Sensors*, vol. 22, iss.17, iss. 17, article no. 6444, pp.1–31, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22176444>.

2. . Kliushnikov, I. M., Fesenko, H. V., Kharchenko, V. S. Scheduling UAV Fleets for the Persistent Operation of UAV-Enabled Wireless Networks During NPP Monitoring. *Radioelectronic and Computer Systems*, vol. 1, iss.93, pp. 29–36, 2020. <https://doi.org/10.32620/reks.2020.1.03>.
3. A. Puente-Castro, D. Rivero, A. Pazos, E. Fernandez-Blanco. A Review of Artificial Intelligence Applied to Path Planning in UAV Swarms. *Neural Computing and Applications*, vol. 34, no. 1, 2022, pp. 153–70. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06569-4>.
4. M. Hooshyar, Y.-M. Huang, Meta-Heuristic Algorithms in UAV Path Planning Optimization: A Systematic Review (2018–2022). *Drones*, vol. 7, no. 12, 2023, p. 687. <https://doi.org/10.3390/drones7120687>.
5. I. Kliushnikov, V. Kharchenko, I. Cherepnov, O. Morozova, S. Rudakov, O. Kompaniets. Structural-Parametric Synthesis of Multi-Agent UAV-based SMR Monitoring system: an Ontology Approach, *13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Athens, Greece, 2023, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416509>.
6. H. Chung, S. Oh, D. H. Shim, S. S. Sastry. Toward Robotic Sensor Webs: Algorithms, Systems, and Experiments. *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 9, 2011, pp. 1562–86. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2158598>.
7. E. Al. M. Mohammed Thaha. An Aerial Robotics Investigation into the Stability, Coordination, and Movement of Strategies for Directing Swarm and Formation of Autonomous MAVs and Diverse Groups of Driverless Vehicles (UGVs). *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, vol. 11, no. 3, 2023, pp. 301–04. <https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i3.8908>.
8. F. Aljalaud, H. Kurdi, K. Youcef-Toumi. Bio-Inspired Multi-UAV Path Planning Heuristics: A Review. *Mathematics*, vol. 11, no. 10, 2023, p. 2356. <https://doi.org/10.3390/math11102356>
9. F. Miao et al. Optimizing UAV Path Planning in Maritime Emergency Transportation: A Novel Multi-Strategy White Shark Optimizer. *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 7, July 2024, p. 1207. <https://doi.org/10.3390/jmse12071207>
10. Y. Gong, K. Chen, T. Niu, Y. Liu. Gong, Yiguang, et al. Grid-Based Coverage Path Planning with NFZ Avoidance for UAV Using Parallel Self-Adaptive Ant Colony Optimization Algorithm in Cloud IoT. *Journal of Cloud Computing*, vol. 11, no. 1, 2022, p. 29. <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00298-2>
11. H. Tang, Q. Zhu, B. Qin, R. Song, Z. Li. UAV Path Planning Based on Third-Party Risk Modeling. *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, 2023, p. 22259. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49396-4>
12. J. Gao, Y. Zheng, K. Ni, Q. Mei, B. Hao, and L. Zheng. Fast Path Planning for Firefighting UAV Based on A-Star Algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2029, no. 1, 2021, p. 012103. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2029/1/012103>
13. L. Li, Z. Wang, J. Zhu, S. Ma. Smartphone-Based Task Scheduling in UAV Networks for Disaster Relief. *Electronics*, vol. 13, no. 15, 2024, p. 2903. <https://doi.org/10.3390/electronics13152903>
14. M. El Debeiki, S. Al-Rubaye, A. Perrusquía, C. Conrad, J. A. Flores-Campos. An Advanced Path Planning and UAV Relay System: Enhancing Connectivity in Rural Environments. *Future Internet*, vol. 16, no. 3, 2024, p. 89. <https://doi.org/10.3390/fi16030089>
15. C. Gao, X. Wang, X. Chen, B. M. Chen. A Hierarchical Multi-UAV Cooperative Framework for Infrastructure Inspection and Reconstruction. *Control Theory and Technology*, vol. 22, no. 3, 2024, pp. 394–405. <https://doi.org/10.1007/s11768-024-00202-0>
16. W. Harris, S. Tseng, T. Viso, M. Weissman, C.-K. Ngan. Swarm Intelligence Path-Planning Pipeline and Algorithms for UAVs: Simulation, Analysis and Recommendation. *Proceedings of the 26th International Conference on Enterprise Information Systems, SCITEPRESS - Science and Technology Publications*, 2024, pp. 747–58. <https://doi.org/10.5220/0012686000003690>
17. Y. Shi, Y. Liu, B. Ju, Z. Wang, X. Du. Multi-UAV Cooperative Reconnaissance Mission Planning Novel Method under Multi-Radar Detection. *Science Progress*, vol. 105, no. 2, 2022, p. 003685042211037. <https://doi.org/10.1177/00368504221103785>
18. Y. Yu, S. Lee. Efficient Multi-UAV Path Planning for Collaborative Area Search Operations. *Applied Sciences*, vol. 13, no. 15, 2023, p. 8728. <https://doi.org/10.3390/app13158728>
19. X. Liu, Y. Su, Y. Wu, Y. Guo. Multi-Conflict-Based Optimal Algorithm for Multi-UAV Cooperative Path Planning. *Drones*, vol. 7, no. 3, 2023, p. 217. <https://doi.org/10.3390/drones7030217>
20. R. Yuhang, Z. Liang. An Adaptive Evolutionary Multi-Objective Estimation of Distribution Algorithm and Its Application to Multi-UAV Path Planning. *IEEE Access*, vol. 11, 2023, pp. 50038–51. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3270297>
21. B. Qiu, X. Li, and X. Li. Joint Offloading Decision and Trajectory Optimization for Multi-UAV-Assisted Mobile Edge Computing System. *Wireless Network*, 2024. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3802943/v1>.
22. Y. Yu, S. Lee. Multi-UAV Coverage Path Assignment Algorithm Considering Flight Time and Energy Consumption. *IEEE Access*, vol. 12, 2024, pp. 26150–62. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3366998>
23. J. Fu, G. Sun, J. Liu, W. Yao, L. Wu. On Hierarchical Multi-UAV Dubins Traveling Salesman Problem Paths in a Complex Obstacle Environment. *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 54, no. 1, 2024, pp. 123–35. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2023.3265926>
24. G. Tang, T. Xiao, P. Du, P. Zhang, K. Liu, L. Tan. Improved PSO-Based Two-Phase Logistics UAV Path Planning under Dynamic Demand and Wind Conditions. *Drones*, vol. 8, no. 8, 2024, p. 356. <https://doi.org/10.3390/drones8080356>
25. M. S. Mondal et al. Cooperative Multi-Agent Planning Framework for Fuel Constrained UAV-UGV Routing Problem. *Preprint arXiv*, 2023. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2309.03397>
26. Z. Li, W. Zhao, C. Liu. Completion Time Minimization for UAV-UGV-Enabled Data Collection. *Sensors*, vol. 22, no. 15, 2022, p. 5839. <https://doi.org/10.3390/s22155839>
27. J. Ni, M. Tang, Y. Chen, W. Cao. An Improved Cooperative Control Method for Hybrid Unmanned Aerial-Ground System in Multitasks. *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2020, 2020, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1155/2020/9429108>
28. T. Ma, P. Lu, F. Deng, K. Geng. Air-Ground Collaborative Multi-Target Detection Task Assignment and Path Planning Optimization. *Drones*, vol. 8, no. 3, 2024, p. 110. <https://doi.org/10.3390/drones8030110>
29. Q. Wu, Z. Geng, Y. Ren, Q. Feng, J. Zhong. Multi-UAV Redeployment Optimization Based on Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Oriented to Swarm Performance Restoration. *Sensors*, vol. 23, no. 23, Nov. 2023, p. 9484. <https://doi.org/10.3390/s23239484>

30. X. Zhao, R. Yang, L. Zhong, Z. Hou. Multi-UAV Path Planning and Following Based on Multi-Agent Reinforcement Learning. *Drones*, vol. 8, no. 1, 2024, p. 18. <https://doi.org/10.3390/drones8010018>
31. M. Yang, G. Liu, Z. Zhou, and J. Wang. Partially Observable Mean Field Multi-Agent Reinforcement Learning Based on Graph Attention Network for UAV Swarms. *Drones*, vol. 7, no. 7, 2023, p. 476. <https://doi.org/10.3390/drones7070476>
32. S. Vyas, S. S. Verma, A. Prasad. Study of UAV Management Using Cloud-Based Systems. *Deep Learning Technologies for the Sustainable Development Goals*, edited by Virender Kadyan et al., Springer Nature Singapore, 2023, pp. 97–110. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5723-9_7
33. M. Aldossary. Optimizing Task Offloading for Collaborative Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Fog–Cloud Computing Environments. *IEEE Access*, vol. 12, 2024, pp. 74698–710. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3405566>
34. L. Matlekovic, F. Juric, P. Schneider-Kamp. Microservices for Autonomous UAV Inspection with UAV Simulation as a Service. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 119, 2022, p. 102548. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2022.102548>
35. A. S. Seisa, S. G. Satpute, B. Lindqvist, G. Nikolakopoulos. An Edge-Based Architecture for Offloading Model Predictive Control for UAVs. *Robotics*, vol. 11, no. 4, 2022, p. 80. <https://doi.org/10.3390/robotics11040080>
36. F. A. Silva et al. Aerial Computing: Enhancing Mobile Cloud Computing with Unmanned Aerial Vehicles as Data Bridges—A Markov Chain Based Dependability Quantification. *ICT Express*, vol. 10, no. 2, 2024, pp. 406–11. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2023.10.002>
37. M. B. Bezziane et al. Game Theory-Based UAV-Cloud for Service Selection Architecture in Flying Ad Hoc Networks. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2024, pp. 1–20. <https://doi.org/10.1109/OJVT.2024.3430818>
38. S. Poghosyan et al. Cloud-Based Mathematical Models for Self-Organizing Swarms of UAVs: Design and Analysis. *Drone Systems and Applications*, vol. 12, 2024, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0039>
39. Y. Zhou, H. Ge, B. Ma, S. Zhang, J. Huang. Collaborative Task Offloading and Resource Allocation with Hybrid Energy Supply for UAV-Assisted Multi-Clouds. *Journal of Cloud Computing*, vol. 11, no. 1, 2022, p. 42. <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00317-2>
40. M. Itkin, M. Kim, Y. Park. Development of Cloud-Based UAV Monitoring and Management System. *Sensors*, vol. 16, no. 11, 2016, p. 1913. <https://doi.org/10.3390/s16111913>
41. H. A. Alharbi, M. Aldossary, J. Almutairi, I. A. Elgendy. Energy-Aware and Secure Task Offloading for Multi-Tier Edge-Cloud Computing Systems. *Sensors*, vol. 23, no. 6, 2023, p. 3254. <https://doi.org/10.3390/s23063254>
42. J. Wang, P. Jiang, J. Qi. A Planning Method for Operational Test of UAV Swarm Based on Mission Reliability. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, vol. 140, no. 2, 2024, pp. 1889–918. <https://doi.org/10.32604/cmescs.2024.049813>
43. I. Ruban, V. Lebediev. Method for Determining the Rational Number of UAV Flotilla Taking Into Account the Reliability of the Aircraft. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, no. 1 (23), 2023, pp. 108–14. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.108>
44. Y. Wang, F. Gao, M. Li. Probabilistic Path Planning for UAVs in Forest Fire Monitoring: Enhancing Patrol Efficiency through Risk Assessment. *Fire*, vol. 7, no. 7, 2024, p. 254. <https://doi.org/10.3390/fire7070254>
45. Y. Xu, J. Li, F. Zhang. A UAV-Based Forest Fire Patrol Path Planning Strategy. *Forests*, vol. 13, no. 11, 2022, p. 1952. <https://doi.org/10.3390/f13111952>
46. J. John and S. Sundaram. Genetic Algorithm-Based Routing and Scheduling for Wildfire Suppression Using a Team of UAVs. *Preprint arXiv*, 2024. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2407.19162>
47. X. Yan, R. Chen. Application Strategy of Unmanned Aerial Vehicle Swarms in Forest Fire Detection Based on the Fusion of Particle Swarm Optimization and Artificial Bee Colony Algorithm. *Applied Sciences*, vol. 14, no. 11, 2024, p. 4937. <https://doi.org/10.3390/app14114937>
48. K. Takahashi, K. Aida, T. Tanjo, J. Sun. A Portable Load Balancer for Kubernetes Cluster. *Proceedings of the International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region, ACM*, 2018, pp. 222–231. <https://doi.org/10.1145/3149457.3149473>

Received (Надійшла) 26.07.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.10.2024

Group application of unmanned aerial vehicles and unmanned ground vehicles: applications, tasks, features and technologies used

Artem Serediuk, Ihor Kliushnikov

Abstract. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) and unmanned ground vehicles (UGVs) is a current trend. At the same time, their individual use is moving to group use when it is necessary to ensure communication and optimal use of resources. The subject of the article is the processes of group use of unmanned aerial and ground vehicles. The purpose of the article is to carry out a comprehensive analysis of the main areas of application of UAVs and UGVs, to determine the methods of task optimization for groups of these devices, and to assess the feasibility and prospects of introducing cloud technologies for task distribution and route optimisation. As a result of the work, it is determined that the most relevant topics in the field of UAVs and UGVs are the use of cloud technologies, the integration of UAVs and UGVs, and the integration of UAVs and UGVs with other technologies. These methods and technologies are actively used in solving complex problems of route planning and task distribution in UAV and UAS groups. However, insufficient attention is paid to the impact of various weather conditions on UAV and UGV operations, as well as to the calculation of mission reliability. These aspects are critically important for the practical application of unmanned systems, especially in difficult conditions and when performing critical tasks. development of adaptive algorithms capable of taking into account dynamic environmental changes and the creation of comprehensive models for assessing mission reliability, taking into account both the technical characteristics of devices and external factors. The direction of further research is the development of adaptive algorithms capable of taking into account dynamic changes in the environment and the creation of complex models for assessing mission reliability, taking into account both the technical characteristics of devices and external factors.

Keywords: unmanned aerial vehicle; unmanned ground vehicles; group application; research review; modern technologies.

Olena Skakalina

National University «Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

CREATION AND RESEARCH OF FORECASTING MODELS OF THE SPREAD AND DEMOGRAPHIC CONSEQUENCES OF COVID-19

Abstract. The outbreak of "pneumonia of unknown etiology" marked the beginning of a new era in global health care and public life. The disease quickly spread throughout the world, turning into a pandemic that posed a serious threat to the international community. Ukraine, like many other countries, has been seriously affected by the consequences of this pandemic. Effective prediction of the spread of COVID-19 is a key task for informing health management and making strategic decisions to minimize the consequences of the pandemic. Many studies have been conducted using different methods and approaches to predict the spread of COVID-19. However, most of these methods do not adequately take into account all aspects that may affect the spread of the disease. This paper analyzes the known methods of forecasting COVID-19, evaluates the impact of various arguments on the spread of the disease, and develops a mathematical model for forecasting. For this, data on the spread of COVID-19 in Ukraine was used.

Keywords: COVID-19, GMDH, forecasting the spread, pandemic.

Introduction

The World Health Organization announced the end of the pandemic status of the coronavirus disease COVID-19. WHO Director-General Dr. Tedros Adhanom Ghebreyesus announced this on May 5, 2023.

According to the WHO, the coronavirus no longer poses such a danger and therefore cancels the global health emergency. At the same time, many countries of the world canceled the state of emergency covered by the pandemic.

The WHO considers the cancellation of the pandemic status of COVID-19 as a key moment in the evolution of humanity's relationship with the coronavirus. Meanwhile, the disease retains the status of a pandemic, like HIV [1].

Due to COVID-19, the Cabinet of Ministers of Ukraine has extended quarantine restrictions on the entire territory of Ukraine until June 30, 2023, as well as the state of emergency in the unified state system of civil protection [2]. As of early May 2023, 5.5 million cases of COVID-19 and more than 110,000 deaths from this disease have been recorded in Ukraine. The first cases of the disease in the country were recorded in March 2020.

The spread of the coronavirus in Ukraine took place in a wave-like manner. The largest wave of cases was in the fall of 2020, when the daily number of new cases exceeded 18,000. In the spring of 2021, the number of new cases decreased to 2-3 thousand per day, but then there was a second wave, and in July the number of new cases exceeded 2,000 daily.

The most infected areas are located in the western and central parts of the country, especially Lviv, Khmelnytskyi, Kyiv, Chernivtsi and Poltava regions. These regions have seen the highest incidence and highest number of deaths from COVID-19. According to WHO data, at the end of April 2023, more than 560 million cases of COVID-19 and more than 7 million deaths from complications of this disease have been confirmed in the world [5]. These numbers could be much higher because not all cases of COVID-19 have been diagnosed and reported. The global spread of the coronavirus has

significantly affected economic and social life. In many countries, this has manifested itself in a decrease in the rate of economic growth, significant delays in solving social problems, and an increase in unemployment.

Literature analysis. Approaches to solving forecasting problems can be classified into the following categories:

- method of group consideration of arguments;
- simulation modeling;
- methods of machine learning;
- epidemiological models;
- statistical methods of forecasting time series.

A comparative analysis of modeling and forecasting methods is important for choosing the best method for predicting the spread of the coronavirus. The advantages and disadvantages of the methods are presented in the Table 1.

These methods have their advantages and disadvantages, and the choice of method depends on the specific situation and task. Some methods, such as simulation modeling and machine learning, require more computing power and access to large amounts of data, while statistical methods for PD prediction may be simpler to apply but less flexible to account for complex dependencies. Epidemiological models are useful for analyzing the distribution of diseases, but may have limited accuracy, depending on the information available and the quality of the data. Each method has its own strengths and weaknesses, and their use should be considered and adapted to the specific situation and research needs.

Article [9] is a study that offers an overview of current prediction models for the disease COVID-19, as of June 2020, when more than 7 months have passed since the beginning of the pandemic.

This article examines the various approaches and methods used to predict the spread of COVID-19. The authors provide a detailed analysis of various methodologies, including statistical models, machine learning techniques, epidemiological and simulation modeling. They review the basic principles of each method and explain their advantages and disadvantages in the context of COVID-19 forecasting.

Table 1 – Advantages and disadvantages of different methods of creating predictive models

Method	Advantages	Disadvantages
GMDH	Easy to use; May contain many factors; Processes a wide range of data;	It is necessary to clearly understand the relationship between the arguments; Processing noisy data can lead to serious errors;
Simulation modeling	Can simulate various scenarios; Conducting research in conditions that are impossible in reality; Conducting research without risk to humans;	Building a model requires a lot of time and resources; May not take into account all factors affecting the system;
Methods of machine learning	Receives accurate forecasts; Processes large volumes of data; Used in various industries;	Training models requires large amounts of high-quality data; They are difficult to use for people without special training;
Epidemiological models	Can understand and predict the spread of disease; Determine optimal disease control and prevention strategies;	It is necessary to understand in detail the features of the disease and other factors that affect the spread of the disease; In some cases, they have insufficient accuracy;
Statistical methods of forecasting time series	Takes into account the dynamics of changes over time; Identifies trends and periodicity in data; Used to make predictions based on past observations	Dependencies are assumed to be stable, but in real life this is not always the case; Unusual events or significant changes in data cannot be accurately predicted;

It also focuses on various aspects of forecasting, including the assessment of parameters such as trends, rates of spread and peak values, which help to better understand the dynamics of the pandemic. The authors consider the practical application of each method in the context of health care management and decision making. They identified the following problems related to forecasting the future situation:

- observation of infected persons and those who came into contact with them;
- long incubation period;
- lack of necessary data;
- model retraining;
- excessive cleaning of data.;
- large volumes of data;
- errors in the selection of algorithms and input functions;
- complexity of the selected model.

A division of the various forecasting methods into main categories has been made, which involve the processing of large amounts of data from various sources such as WHO, National Data Sources and social media. This classification, without a doubt, can be useful for researchers, inspire them with new ideas for further forecasting.

Group method of data handling

GMDH can be used to predict the spread of the coronavirus. The method involves statistical analysis of data to search for factors affecting the spread of the virus.

In order to apply GMDH to coronavirus, it is necessary to collect data on past cases of infection, their distribution, time and place of occurrence, etc. MGUA reveals complex interrelationships between factors influencing the spread of the virus that are not easily observed. The method is also useful for predicting the risk of infection in the future and allows timely countermeasures.

The article [10] presents the results of modeling the process of the COVID-19 pandemic in Ukraine using official statistics on confirmed cases of the disease. The main goal of the article is to define a dynamic model of the process, which is expressed in the form of a disaster.

Four methods of constructing an autoregressive predictive differential model were used in the study. It is assumed that the basic forecasts are obtained by conventional autoregressive methods. The modified predictions obtained from the baseline predictions are compared using combinatorial genetic algorithms GMDH COMBI-GA and the Lasso method. The research is useful for predicting the further spread of coronaviruses in order to identify trends in time and implement specific protection measures. Forecasts using combinatorial genetic algorithms turned out to be the most meaningful.

Simulation modeling

The article [11] describes a detailed study of the spread of COVID-19 in the city of Daegu, located in South Korea. The authors used an individual-oriented simulation model to understand and predict the dynamics of the spread of the virus among the city's population.

The model is based on an individual modeling approach where each agent in the model corresponds to an individual with its unique characteristics, behavior and interactions with other agents. When developing a model of viral transmission, various factors are taken into account, such as geographic location, population density, contact network and activity level of people.

Researchers run simulations with different scenarios and control strategies, such as quarantine, social distancing and mass testing, to assess their effectiveness and impact on the spread of the virus. They also make forecasts to assess the future development of the pandemic and develop recommendations for strategic decision-making in crisis management.

The main advantage of this work is that the simulation model for individuals can be used to reproduce in detail the reality of the spread of the virus in the population. This allows researchers to analyze different scenarios and control strategies, evaluate their effectiveness and make predictions about the further development of the pandemic.

The research also has some drawbacks. They are characterized by the limited generality with which the

simulation model developed for the city of Daegu can be applied to this particular context. Due to different geographical, sociocultural and epidemiological characteristics, the results may not be applicable to other places. As with any model, there are some assumptions and uncertainties that can affect the accuracy and reliability of the results. The model is simulation-based, so it may have limited ability to predict long-term trends and complex evolutionary changes in a pandemic. Although it can be useful for short-term forecasts and for evaluating the impact of specific strategies, it should be remembered that long-term forecasts may be less accurate.

In [12], it is proposed to use a simulation model to analyze possible scenarios and strategies for controlling the spread of COVID-19 in universities.

The authors use mathematical modeling and agent simulation to reproduce real situations of the spread of the virus in the university environment, among students, teachers and other employees. Factors such as population density, frequency of contact, implementation of safety measures, testing and quarantine are also considered.

The authors use simulation modeling to analyze different control scenarios, such as social distancing, mass testing, vaccination, and the introduction of safety protocols. The impact of these strategies on the spread of the virus, the number of infected individuals, and the ability to control the pandemic in a university environment is being investigated.

The results of this study highlight the importance of combining different control strategies, such as social distancing, mass testing, vaccination, and implementation of safety protocols, to effectively manage the spread of COVID-19 in the university community.

If we talk about simulation modeling in general, we can conclude that it is an important approach for understanding the spread of COVID-19. The only drawback is the lack of statistical data. Currently, we can only artificially simulate all the parameters defined by the authors of previous works.

Methods of machine learning

In [13], machine learning methods are used to create forecasts about the number of infected, recovered and dead people up to 10 days later. The data was obtained from Hopkins University.

Research has shown that linear regression will provide better results than other methods in this case. The authors noted that improved forecasts will allow governments to take timely measures and make decisions to prevent crisis situations related to COVID-19.

The following article [14] uses data obtained from the Ministry of Health of Israel. The dataset includes the daily primary registration of all residents tested for COVID-19 across the country. The researchers developed a model to predict test results using eight binary variables: sex, age (60 years or older), presence of contact with an infected person, and severity of five clinical symptoms. Initially, the database contained 51,831 records of people who had been tested. The

model was built using decision trees with gradient boosting. The method proved effective and showed good accuracy, but required data on people's tests and symptoms, not just a single time series.

Epidemiological modeling

The work [15] used the logistic growth curve model for short-term forecasting; SIR models for predicting the maximum number of active cases and peak times; and a time-lagged regression model to estimate the impact of quarantine and other interventions.

A logistic growth curve model accurately predicts the short-term scenario for India and high-incidence states. Forecasting through the SIR model can be used to plan and prepare health care systems. The study also suggests that there is no evidence that there is a positive effect of quarantine on reducing new cases.

In the article [16] for August 2020, researcher Ihor Nesteruk analyzes the new wave of the COVID-19 pandemic in Ukraine and its dynamics. Epidemic waves are caused by a number of factors, including quarantine conditions, pathogen activity, and compliance with quarantine restrictions. In this work, the classic SIR model is used to forecast the outbreak waves: four waves are distinguished and calculations are made for the fifth and sixth waves. Taking into account the forecasting period, the final estimate of the number of cases is worse, which is quite reasonable given the beginning of the holiday season and non-compliance with the mask regime.

Statistical forecasting methods

The article [17] analyzes the growth model of the COVID-19 pandemic in India from March 4 to July 11 using regression analysis (exponential and polynomial), ARIMA, and exponential smoothing and the Holt-Winters model. The study revealed periods of geometric regression, quadratic regression and linear growth in prevalence. After analyzing each forecasting method, it was concluded that ARIMA gave the best results with an accuracy of 97.38%. The Holt-Winters model took second place with an accuracy of 97.11%. When estimating the number of patients in India, it does not make sense to compare scenarios with other countries due to different demographics. The next step was to split the series and use ARIMA to forecast for a shorter period of time, resulting in a forecast accuracy of 99.86%.

The following article [18] describes the application of a logistic model for forecasting.

A generalized logistic equation is used to interpret data on the COVID-19 epidemic in several countries: Austria, Switzerland, the Netherlands, Italy, Turkey, and South Korea. Model coefficients are calculated: growth rate and expected number of infected, as well as exponential indicators in the generalized logistic equation. The dependence of the number of infected persons on time is on average well described by a logistic curve with a coefficient of determination exceeding 0.8. At the same time, the dependence of the number of infected people per day on time has an uneven character

and is approximately described by a logistic curve. Therefore, it is necessary to take into account the dependence of the model coefficients on time or on the total number of cases. The spectra of the variability of the coefficients have characteristic peaks with a period of several days, which corresponds to the observed serial intervals. A stochastic logistic equation was used to estimate the number of probable disease peaks.

In the end, the authors note that the real variability of daily virus testing data is related to uncontrolled conditions of administrative actions and social behavior of people. The best approximation for such uncontrolled factors is approximation by random functions.

In [19] a study was conducted to forecast the situation in Pakistan using ARIMA. Three projections were made for confirmed cases, recoveries and deaths. It was concluded that the choice of methods as well as accurate data from the Ministry of Health is important for evaluation. It was also noted that there is always uncertainty due to the insufficient amount of historical data, which makes it impossible to identify specific patterns based on this data.

Object, subject and methods of research

The object of the study is the spread of COVID-19 in Ukraine. The subject of the study is the development of a methodology using GMDH for forecasting the spread of COVID-19 in Ukraine. The method of group consideration of arguments is an approach that allows taking into account various factors that influence the spread of a disease, such as socio-economic, demographic and medical indicators. Statistical models for analysis of collected data and development of a mathematical model for forecasting the spread of COVID-19 on the basis of GMDH were used as research methods.

Results

Group reasoning is used for deep learning, knowledge discovery, data prediction and analysis, optimization and pattern recognition in many fields such as economic, environmental, medical, demographic, meteorological, military and many others. GMDH's inductive algorithms automatically discover relationships in the data and select the best models and network structures to improve the accuracy of existing systems.

This unique approach to self-organization differs from the deductive method used for modeling. It is inductive and seeks the best solution from a set of possible alternatives. GMDH aims to minimize the influence of the author on the simulation results by ranking different network solutions. The computer finds the optimal model

structure and law to apply to the system. GMDH is a set of various algorithms for solving various tasks. It consists of parametric algorithms, clustering, analog binding, library and probabilistic algorithms.

This inductive approach ranks increasingly complex models and selects the optimal solution based on the minimum externality criterion. Nonlinear, stochastic functions, clustering, and polynomials are used as basic models [20].

Formation of the sample

The following factors were used to describe the factors used to predict the spread of the virus:

- Infected
- Fatalities
- Recovered

3 algorithms from the GMDH Shell platform are used to build models: combinatorial (Combi), neural network (Neuro), step-by-step mixed (Mixed). The first two are traditional GMDH algorithms. Another is a regression analysis algorithm, but it uses model generation based on the principles of GMDH.

This study used official statistics on cases of COVID-19 among patients in Ukraine for the period from March 3, 2020 to February 1, 2022. Since after the deployment of Russian troops on the territory of Ukraine, the accuracy of statistical data decreased, information about recovery became unreliable and in some cases completely absent. However, this does not indicate the disappearance of COVID-19, since the next update of statistics was carried out in the month of September, where the number of cases is not decreasing. In order to achieve greater forecast accuracy, this time period was taken into account for the analysis.

In accordance with the task, the time series of the listed indicators were constructed, and we also forecast the data of the listed indicators for the cut-off of the forecast horizon with a step of 12 combinatorial GMDH, neural network GMDH and stepwise mixed GMDH.

The results of the validation of the forecasting model based on the combinatorial algorithm of GMDH

After applying the algorithm creation parameters, the following results were obtained. Variable "Infected" (Fig. 1, Tabl. 2).

Results of the validation of the predictive model based on the GMDH neural network algorithm

After applying the algorithm creation parameters, the following results were obtained. The "Infected" variable (Fig. 2, Tabl. 3).

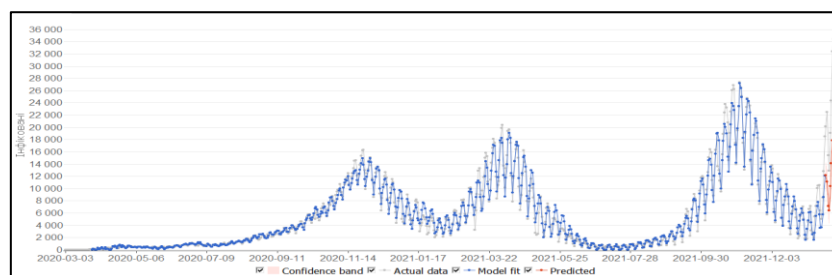


Fig. 1. Combinatorial MGUA for the variable "Infected"

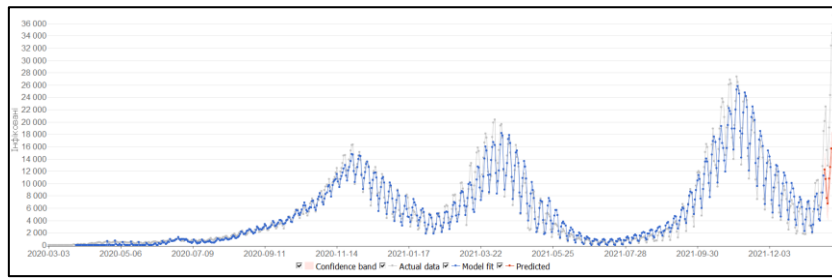


Fig. 2. Neural network MGUA for the variable "Infected"

Table 2 – Actual values "Infected" combinatorial MGUA

Results of final processing	Teaching	Exam
Number of observations	664	12
Max. negative deviation	-4,8932%	-6,4797%
Max. positive deviation	5,1722%	8,2834%
Mean Percent Error (MAPE)	2,73033%	5,4899%
Root Mean Square Deviation in Percent (RMSPE)	4,49645%	7,5847%
The sum of deviations	25,5627%	-35,988%
Standard deviation of residuals	4,49613%	4,9339%
Coefficient of determination (R2)	0,955499	0,918739
Correlation	0,978103	0,945353

Table 3 – Actual "Infected" values of neural network GMDH

Results of final processing	Teaching	Exam
Number of observations	456	12
Max. negative deviation	-26,799%	-81,404%
Max. positive deviation	22,8915%	0%
Mean Percent Error (MAPE)	5,60189%	47,339%
Root Mean Square Deviation in Percent (RMSPE)	7,42653%	50,347%
The sum of deviations	426,961%	-568,07%
Standard deviation of residuals	7,36727%	17,1282%
Coefficient of determination (R2)	0,887649	-2,56757
Correlation	0,943923	0,924417

Step-by-step mixed algorithm

After applying the algorithm creation parameters, the following results were obtained. The "Infected" variable (Fig. 3, Tabl. 4).

Comparative analysis of varieties of GMDH

To compare the obtained models, a table of indicators of the obtained descriptive statistics was created. It was created for all the factors that were investigated. In this work, the results are given for the "Infected" variable. Comparing the values in the tables, we see that the combinatorial GMDH has a smaller average absolute error, so we conclude that the combinatorial GMDH is more accurate than the others (Tabl. 5).

Table 4 – Actual "Infected" values of step-by-step mixed GMDH

Results of final processing	Teaching	Exam
Number of observations	665	12
Max. negative deviation	-24,786%	-75,205%
Max. positive deviation	19,5493%	0%
Mean Percent Error (MAPE)	2,7967%	45,345%
Root Mean Square Deviation in Percent (RMSPE)	4,38279%	47,6518%
The sum of deviations	-37,758%	-544,15%
Standard deviation of residuals	4,38243%	14,642%
Coefficient of determination (R2)	0,957717	-2,19637
Correlation	0,979502	0,946733

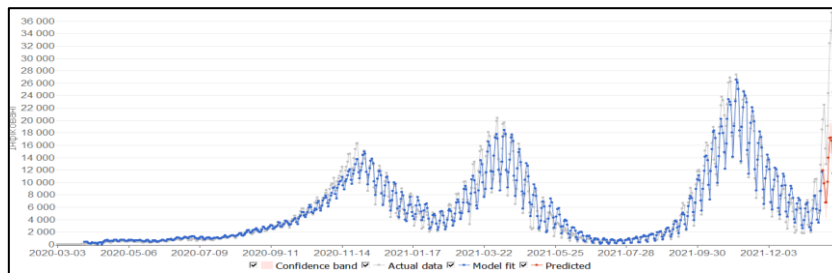


Fig. 3. Step-by-step mixed GMDH for the variable "Infected"

Table 5 – Indicators of descriptive statistics of GMDH models of the "Infected" variable

	Combinatorial		Neural network		Turn-by-turn mixed	
	Training	Foresight	Training	Foresight	Training	Foresight
Number of observations	664	12	456	12	665	12
Maximum negative error	-4,8932%	-6,4797%	-26,799%	-81,404%	-24,786%	-75,205%
Maximum positive error	5,1722%	8,2834%	22,8915%	0%	19,5493%	0%
Mean absolute percentage error(MAPE)	2,73033%	5,4899%	5,60189%	47,339%	2,7967%	45,345%
Root Mean Square Percentage Error (RMSPE)	4,49645%	7,5847%	7,42653%	50,347%	4,38279%	47,652%
The sum of deviations	25,5627%	-35,988%	426,961%	-568,07%	-37,758%	-544,15%
Standard deviation of residuals	4,49613%	4,9339%	7,36727%	17,1282%	4,38243%	14,642%
Coefficient of determination (R2)	0,955499	0,918739	0,887649	-2,56757	0,957717	-2,19637
Correlation coefficient	0,978103	0,945353	0,943923	0,924417	0,979502	0,946733

In order to verify the reliability of the obtained results, let's compare the distribution of the obtained residuals (Fig. 4). Calculation formulas for GMDH

algorithms were obtained (Fig. 5 – 7). Similar mathematical predictive models were obtained for the variables Recovered and Deaths.

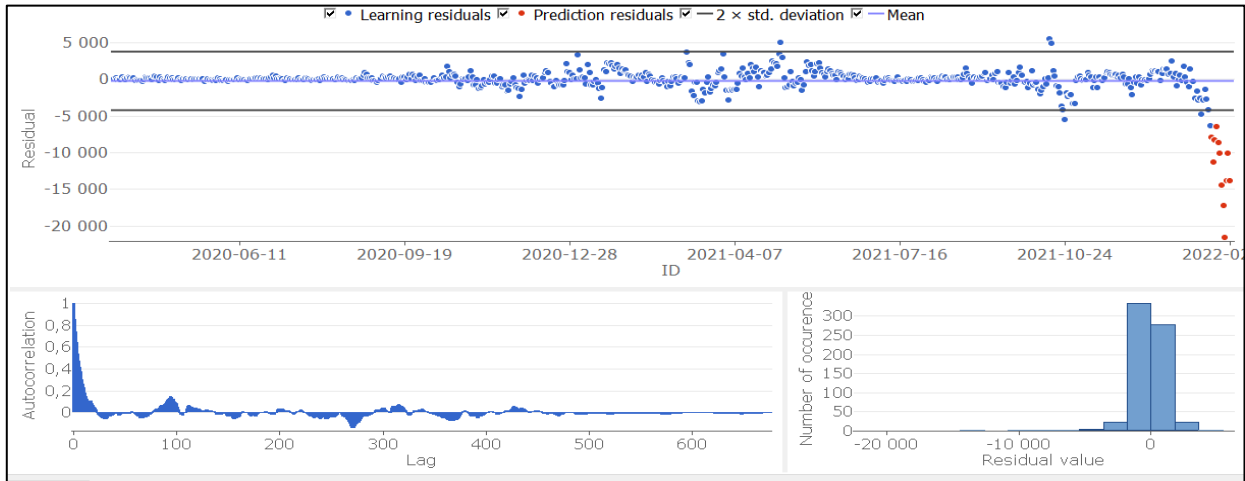


Fig. 4. Distribution of residuals of the series of the "Infected" variable of the combinatorial GMDH

$$Y1[t] = -1618.89 + \text{Інфіковані}[t-7] * \text{Інфіковані}[t-1], \text{cubert}^{**}0.0433502 + \text{Інфіковані}[t-7] * \text{Інфіковані}[t-8] * (-9.29957e-06) + \text{Інфіковані}[t-1] * \text{cycle} * 4.01134e-05 + \text{Інфіковані}[t-6] * \text{Інфіковані}[t-1], \text{cubert}^{**}(-0.00302266) + \text{Інфіковані}[t-1], \text{cubert}^{**}(-38.2424) + \text{Інфіковані}[t-8], \text{cubert}^{**} * \text{Інфіковані}[t-9], \text{cubert}^{**}13.4263 + \text{Інфіковані}[t-7] * \text{Інфіковані}[t-9], \text{cubert}^{**}(-0.0307405) + \text{Інфіковані}[t-1], \text{cubert}^{**} * \text{Інфіковані}[t-6], \text{cubert}^{**}18.5437 + \text{Інфіковані}[t-2] * \text{cycle} * 7.4818e-06 + \text{Інфіковані}[t-2], \text{cubert}^{**} * \text{Інфіковані}[t-8], \text{cubert}^{**}(-8.9343) + \text{Інфіковані}[t-9] * \text{cycle} * 3.2044e-06 + \text{cycle} * 0.26896 + \text{Інфіковані}[t-1] * \text{Інфіковані}[t-7] * (-3.12521e-05) + \text{Інфіковані}[t-6] * \text{Інфіковані}[t-11] * 2.70739e-06 + \text{Інфіковані}[t-2], \text{cubert}^{**} * \text{Інфіковані}[t-3], \text{cubert}^{**}6.26657 + \text{Інфіковані}[t-7] * \text{Інфіковані}[t-8], \text{cubert}^{**}(-0.0393959) + \text{Інфіковані}[t-9] * \text{Інфіковані}[t-3], \text{cubert}^{**}(-0.039301) + \text{Інфіковані}[t-3] * \text{Інфіковані}[t-3], \text{cubert}^{**}0.00569815 + \text{Інфіковані}[t-7] * \text{Інфіковані}[t-11], \text{cubert}^{**}0.050938 + \text{Інфіковані}[t-2], \text{cubert}^{**} * \text{Інфіковані}[t-10], \text{cubert}^{**}12.1116 + \text{Інфіковані}[t-9] * \text{Інфіковані}[t-6], \text{cubert}^{**}0.00676234 + \text{Інфіковані}[t-7] * \text{Інфіковані}[t-9] * 3.80441e-05 + \text{Інфіковані}[t-7] * \text{cycle} * (-1.55226e-05) + \text{Інфіковані}[t-11] * \text{Інфіковані}[t-11], \text{cubert}^{**}(-0.0630896) + \text{Інфіковані}[t-11] * \text{Інфіковані}[t-10], \text{cubert}^{**}0.0392643 + \text{Інфіковані}[t-10] * \text{Інфіковані}[t-6], \text{cubert}^{**}(-0.0102642) + \text{Інфіковані}[t-2], \text{cubert}^{**} * \text{cycle} * (-0.0221279) + \text{Інфіковані}[t-2] * \text{Інфіковані}[t-11], \text{cubert}^{**}(-0.021685) + \text{Інфіковані}[t-8], \text{cubert}^{**} * \text{Інфіковані}[t-10], \text{cubert}^{**}(-18.9774) + \text{Інфіковані}[t-8] * \text{Інфіковані}[t-8], \text{cubert}^{**}0.00861705 + \text{Інфіковані}[t-1] * \text{Інфіковані}[t-11], \text{cubert}^{**}(-0.0406456) + \text{Інфіковані}[t-11] * \text{Інфіковані}[t-2], \text{cubert}^{**}0.0507985 + \text{Інфіковані}[t-1] * \text{Інфіковані}[t-8], \text{cubert}^{**}0.0453702 + \text{Інфіковані}[t-1] * \text{Інфіковані}[t-8] * (-1.16938e-05)$$

Fig. 5. The mathematical model of the time series was obtained using the combinatorial GMDH for the variable "Infected"

ID моделі: +1 #1
 Складність моделі: 30 з 326 Значення критерію: 0

$$Y1[t] = 128.663 + \text{Інфіковані}[t-7] * \text{Інфіковані}[t-8] * (-2.37025e-05) + \text{Інфіковані}[t-8] * \text{cycle} * 1.57124e-05 + \text{Інфіковані}[t-1] * \text{Інфіковані}[t-5] * (-1.71477e-05) + \text{Інфіковані}[t-7] * \text{Інфіковані}[t-11] * 4.55765e-05 + \text{Інфіковані}[t-11] * \text{Інфіковані}[t-12] * (-4.4346e-05) + \text{Інфіковані}[t-10], \text{cubert}^{**} * \text{cycle} * (-0.0124289) + \text{Інфіковані}[t-1] * \text{Інфіковані}[t-1], \text{cubert}^{**}0.0881802 + \text{Інфіковані}[t-1] * \text{Інфіковані}[t-5], \text{cubert}^{**}(-0.122514) + \text{Інфіковані}[t-1] * \text{Інфіковані}[t-4] * (-1.25223e-05) + \text{Інфіковані}[t-5] * \text{Інфіковані}[t-8], \text{cubert}^{**}(-0.037494) + \text{Інфіковані}[t-5] * \text{Інфіковані}[t-1], \text{cubert}^{**}0.138385 + \text{Інфіковані}[t-10] * \text{Інфіковані}[t-12] * 4.2451e-05 + \text{Інфіковані}[t-10] * \text{Інфіковані}[t-7], \text{cubert}^{**}(-0.0370063) + \text{Інфіковані}[t-6], \text{cubert}^{**} * \text{Інфіковані}[t-10], \text{cubert}^{**}16.5001 + \text{Інфіковані}[t-5] * \text{Інфіковані}[t-11], \text{cubert}^{**}(-0.0460126) + \text{Інфіковані}[t-8] * \text{Інфіковані}[t-12] * (-7.5576e-06) + \text{Інфіковані}[t-5], \text{cubert}^{**} * \text{Інфіковані}[t-9], \text{cubert}^{**}(-19.6297) + \text{Інфіковані}[t-11] * \text{Інфіковані}[t-7], \text{cubert}^{**}0.0271007 + \text{Інфіковані}[t-9], \text{cubert}^{**} * \text{cycle} * 0.00654018 + \text{Інфіковані}[t-2] * \text{Інфіковані}[t-5] * (-7.09562e-06) + \text{Інфіковані}[t-8], \text{cubert}^{**} * \text{Інфіковані}[t-11], \text{cubert}^{**}(-9.29727) + \text{Інфіковані}[t-8] * \text{Інфіковані}[t-6], \text{cubert}^{**}0.0129638 + \text{Інфіковані}[t-6] * \text{Інфіковані}[t-10], \text{cubert}^{**}(-0.0290325) + \text{Інфіковані}[t-6] * \text{Інфіковані}[t-9], \text{cubert}^{**}0.0250301 + \text{Інфіковані}[t-5], \text{cubert}^{**} * \text{Інфіковані}[t-10], \text{cubert}^{**}14.4743 + \text{Інфіковані}[t-1], \text{cubert}^{**} * \text{Інфіковані}[t-8], \text{cubert}^{**}3.76744 + \text{Інфіковані}[t-5] * \text{Інфіковані}[t-10], \text{cubert}^{**}0.0134076 + \text{Інфіковані}[t-1], \text{cubert}^{**} * \text{cycle} * 0.00441033 + \text{Інфіковані}[t-1] * \text{Інфіковані}[t-3] * 1.64818e-06$$

Fig. 6. Mathematical model of TS obtained using a step-by-step mixed GMDH for the variable "Infected"

$$Y1[t] = 7.47396 - N7 * 0.0770928 + N2 * 1.07613$$

$$N2[t] = 17.2623 - N5 * 0.707717 + N3 * 1.70549$$

$$N3[t] = 119.582 - \text{Видужали}[t-12] * 0.0473431 + N4 * 1.03226$$

$$N4[t] = -95.8494 + \text{Видужали}[t-6] * 0.0891133 + N5 * 0.922716$$

$$N5[t] = -104.351 - \text{Видужали}[t-7] * 0.373977 + N6 * 1.38976$$

$$N6[t] = -76.1713 + |id, \text{dayofweek}_4 * 626.253 + N7 * 0.998175$$

$$N7[t] = 78.3491 - \text{Видужали}[t-8] * 0.368717 + N8 * 1.36057$$

$$N8[t] = 203.121 + \text{Видужали}[t-1] * 0.338078 + \text{Видужали}[t-7] * 0.631654$$

Fig. 7. Mathematical model of TS obtained with the help of neural network GMDH for the variable "Recovered"

Conclusions

After reviewing the obtained mathematical models with the help of the combinatorial algorithm of GMDH,

the neural network algorithm of MGUA, and the step-by-step mixed algorithm of GMDH, it can be firmly stated that neural network models are more complex than combinatorial ones, and step-by-step mixed models, in turn, are more complex than neural network models. Since the results demonstrated by neural network models have a greater deviation from the average, and therefore are of lower quality for predictions, from the point of view of practical implementation, they are much more expensive. As a result, it can be concluded that the GMDH combinatorial algorithm is more suitable for building a TS based on this problem.

Since the official data on the development of the coronavirus infection after February 24, 2022 are inaccurate, nevertheless, they occasionally coincide with the predicted data of the GMDH combinatorial algorithm.

Which indicates the accuracy and reliability of this algorithm.

The study carried out forecasting of the spread of COVID-19 in Ukraine using GMDH. The following tasks were performed:

➤ a review of the subject activity was carried out, including the history of the emergence of COVID-19 and comparison with other pandemics. In particular, the importance of research and analysis of the COVID-19 pandemic was considered.

➤ a comparative analysis of various modeling and forecasting methods was carried out, including GMDH, simulation modeling, machine learning methods, epidemiological models and statistical methods of TS forecasting.

This study shows that GMDH is an effective method for predicting the spread of the COVID-19 pandemic. GMDH can be used to make accurate forecasts and reasonable recommendations for further management of the situation.

Thus, the results of this study demonstrate the importance of GMDH as a forecasting and management tool in the context of the COVID-19 pandemic, which can be used for further research and decision-making in the field of public health and crisis management.

REFERENCES

1. Yaroslava, Pradyd. (2023, 15 november). *WHO canceled the global pandemic status of the coronavirus*. https://zaxid.net/vooz_skasuvata_status_pandemiyi_cherez_covid_19_n1563000.
2. Ukrinform. (2023, december). *WHO canceled the status of the pandemic of COVID-19*: <https://www.ukrinform.ua/rubric-society/3705279-vooz-skasuvata-status-pandemii-covid19.html>.
3. Corona virus - *Statistics by countries*. (2023, november). <https://index.minfin.com.ua/ua/reference/coronavirus/geography.html>.
4. G. R. Shinde, A. B. Kalamkar, P. N. Mahalle, N. Dey, J. Chaki, and A. E. Hassanien, *Forecasting Models for Coronavirus Disease (COVID-19)*. (2020). A Survey of the State-of-the-Art, *SN Computer Science*, vol. 1, no. 4. <https://doi:10.1007/s42979-020-00209-9>.
5. Shakhovska N., Medykovsky M.O. (eds.). (2021). *GMDH-Based Discovering Dynamic Regularities of the Ukraine Covid-19 Pandemic Process, in Advances in Intelligent Systems and Computing V*, Cham, 456–470. https://doi:10.1007/978-3-030-63270-0_30.
6. W.-S. Son and RISEWIDs Team. (2020). *Individual-based simulation model for COVID-19 transmission in Daegu, Korea*, *Epidemiol Health*, vol. 42, p. e2020042. <https://doi:10.4178/epi2020042>.
7. N. Ghaffarzagdegan. (2021). *Simulation-based what-if analysis for controlling the spread of Covid-19 in universities*, *PLOS ONE*, vol. 16, no. 2, p. e0246323. <https://doi:10.1371/journal.pone.0246323>.
8. R. K. Mojada, A. Yadav, A. V. Prabhu, and Y. Natarajan. (2020). *Machine learning models for covid-19 future forecasting*, *Mater Today Proc*. <https://doi:10.1016/j.matpr.2020.10.962>.
9. Y. Zoabi, S. Deri-Rozov, and N. Shomron. (2021). *Machine learning-based prediction of COVID-19 diagnosis based on symptoms*, *npj Digital Medicine*, vol. 4, no. 1, Art. no. 1. <https://doi:10.1038/s41746-020-00372-6>.
10. B. Malavika, S. Marimuthu, M. Joy, A. Nadaraj, E. S. Asirvatham, and L. Jeyaseelan. (2021). *Forecasting COVID-19 epidemic in India and high incidence states using SIR and logistic growth models*, *Clinical Epidemiology and Global Health*, vol. 9, 26–33. <https://doi:10.1016/j.cegh.2020.06.006>.
11. I. Nesterukю (2020). *New waves of the COVID-19 pandemic in Ukraine* [“New waves of COVID-19 pandemic in Ukraine”].
12. V. K. Sharma and U. Nigam. (2020). *Modeling and Forecasting of COVID-19 Growth Curve in India*, *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*, 1–14. <https://doi:10.1007/s41403-020-00165-z>.
13. Logistic equation and COVID-19 (2023, december). *PubMed Central (PMC)*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7444956>.
14. M. Yousaf, S. Zahir, M. Riaz, S. M. Hussain, and K. Shah. (2020). *Statistical analysis of forecasting COVID-19 for upcoming month in Pakistan*, *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 138. <https://doi:10.1016/j.chaos.2020.109926>.

Received (Надійшла) 17.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.11.2024

Створення та дослідження моделей прогнозування поширення та демографічних наслідків COVID-19

О. В. Скакаліна

Анотація. Спалах «пневмонії невідомої етіології» ознаменував початок нової ери у світовій охороні здоров'я та суспільному житті. Хвороба швидко поширилася по всьому світу, перетворившись на пандемію, яка становила серйозну загрозу для міжнародної спільноти. Україна, як і багато інших країн, серйозно постраждала від наслідків цієї пандемії. Ефективне прогнозування поширення COVID-19 є ключовим завданням для інформування керівництва охорони здоров'я та прийняття стратегічних рішень щодо мінімізації наслідків пандемії. Було проведено багато досліджень з використанням різних методів і підходів для прогнозування поширення COVID-19. Однак більшість із цих методів не враховують належним чином усі аспекти, які можуть вплинути на поширення захворювання. У цій роботі аналізуються відомі методи прогнозування COVID-19, оцінюється вплив різних аргументів на поширення хвороби та розробляється математична модель для прогнозування. Для цього були використані дані про поширення COVID-19 в Україні.

Ключові слова: COVID-19, GMDH, прогнозування поширення, пандемія.

С. Ф. Чалий, В. О. Лещинський

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПОЯСНЕНЬ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЦІЇ ТЕМПОРАЛЬНИХ ТА КАУЗАЛЬНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ

Анотація. Предметом вивчення в статті є процеси побудови пояснень в інтелектуальних системах з використанням темпоральних та каузальних залежностей. **Метою** є розробка підходу до побудови пояснень на основі інтеграції темпоральних та каузальних залежностей щодо процесу прийняття рішення з тим, щоб забезпечити можливість формування пояснення як для зовнішніх, так і для внутрішніх користувачів інтелектуальних інформаційних систем. **Завдання:** визначення відмінностей доступу до інформації в ІС для зовнішніх та внутрішніх користувачів; розробка ієрархічної моделі пояснення на базі темпоральних та каузальних залежностей; розробка методу побудови пояснення з використанням темпоральних та каузальних залежностей. Використовуваними **підходами** є: методи побудови пояснень, методи побудови каузальних залежностей. Отримані наступні **результати**. Виконано структурування відмінностей доступу до інформації користувачів інтелектуальних систем для обґрунтування необхідності багаторівневої деталізації пояснень. Запропоновано ієрархічну модель пояснення на основі темпоральних та каузальних залежностей. Запропоновано метод побудови пояснень з використанням темпоральних та каузальних залежностей між станами або діями процесу формування рішення в інтелектуальній системі. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Запропоновано ієрархічну модель пояснення, яка містить локальний, процесний та глобальний рівні пояснень згідно можливостей доступу користувачів до інформації щодо процесу формування рішення, що дає можливість враховувати неповноту інформації щодо стану інтелектуальної системи при поясненні її рішень для зовнішніх та внутрішніх користувачів. Розроблено метод побудови пояснень, який містить фази побудови пояснень з використанням темпоральних та каузальних залежностей між вхідними даними, станами процесу формування рішення та отриманим результатом та представлення пояснень, що дає можливість сформувати каузальні залежності на декількох рівнях деталізації та представити їх користувачу у вигляді упорядкованої за вагою множини альтернативних пояснень.

Ключові слова: інтелектуальна система, система штучного інтелекту, пояснення, процес прийняття рішення, темпоральні залежності, каузальні залежності, каузальність, можливість.

Вступ

Сучасні інтелектуальні інформаційні системи (ІС) широко використовують алгоритми машинного навчання для вирішення складних практичних задач, пов'язаних із класифікацією, прогнозуванням, побудовою рекомендацій тощо. Однак, такі алгоритми зазвичай є непрозорими для користувачів, тобто приводять до відображення ІС як «чорної скриньки» або «сірої скриньки» [1]. Непрозорість означає, що користувачі не мають доступу до внутрішньої логіки роботи системи і тому не мають можливості пояснити, як саме приймаються рішення.

Для забезпечення довіри користувачів до результатів роботи ІС необхідно, щоб вони розуміли процес побудови рішення та причини отриманого результату [2]. Для того, щоб забезпечити зрозумілість для користувачів, процес прийняття рішень в ІС має бути інтерпретованим. Для інтерпретації роботи непрозорих ІС необхідно формувати пояснення, які розкривають логіку функціонування інтелектуальної системи [3].

Такі пояснення мають враховувати відмінності між зовнішніми та внутрішніми користувачами ІС. Зовнішніми користувачами є кінцеві споживачі рішень системи, наприклад, клієнти рекомендаційних систем на платформах електронної комерції. Внутрішніми користувачами є аналітики та експерти, які займаються налаштуванням та підтримкою інтелектуальних інформаційних систем, наприклад коригують тип рекомендацій [2].

Відповідно, для зовнішніх користувачів важливим є розуміння, які саме вхідні дані стали причиною отриманого рішення. Тому пояснення для цієї категорії користувачів мають базуватись на каузальних залежностях [5] між значеннями вхідних змінних та результатом роботи ІС. Це дає можливість користувачам оцінити відповідність рішення їх потребам.

Для внутрішніх користувачів створити умови для аналізу та удосконалення процесу формування рішень в ІС.

Тому пояснення для цієї категорії користувачів мають враховувати темпоральну упорядкованість дій процесу прийняття рішень, а також причинно-наслідкові зв'язки між проміжними діями та кінцевим результатом [6].

Таким чином, проблема побудови процесно-орієнтованих пояснень для внутрішніх користувачів і каузальних пояснень для зовнішніх користувачів є актуальною.

Широкі дослідження в сфері побудови пояснень для інтелектуальних систем започатковані згідно програми XAI (Explainable Artificial Intelligence) від агентства DARPA [3]. Ця програма орієнтована на створення методів побудови зрозумілих моделей формування рішень в ІС, а також на розробку інтерфейсів представлення пояснень щодо рішень, отриманих в таких системах.

Існуючі методи побудови пояснень можна розділити на дві групи, пов'язані з прозорістю або непрозорістю інтелектуальних інформаційних систем:

методи, що базуються на інтерпретації моделі, та методи пост-обробки [7].

Перша група включає методи, що використовують моделі, які можуть бути безпосередньо інтерпретовані користувачем, наприклад, дерева рішень або лінійні моделі.

Друга група методів передбачає побудову додаткової моделі, яка апроксимує початкову модель прийняття рішень і використовується для формування пояснень.

Для пост-обробки на сьогодні широко використовуються алгоритми LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) [8] та SHAP (SHapley Additive exPlanations) [9].

Алгоритм LIME будує локальну інтерпретовану модель (наприклад, лінійну регресію) навколо конкретного рішення базової моделі. Локальна модель апроксимує поведінку базової моделі і може бути використана як пояснення, визначаючи, які ознаки найбільше вплинули на результат.

Метод SHAP базується на теорії ігор Шеплі. Він обчислює внесок кожної ознаки у отримане рішення на основі усереднення внеску ознаки по всім можливим множинам ознак.

Для побудови пояснень щодо процесу обробки зображень виконується візуалізація областей зображень, які мали найбільший вплив на рішення моделі комп'ютерного зору. Вони будуються шляхом обчислення градієнтів функції втрат відносно пікселів вхідного зображення [10].

Розглянуті методи фокусуються на поясненні впливу окремих ознак на рішення ІС, але не враховують причинно-наслідкові зв'язки та послідовність дій у процесі прийняття рішень.

Темпоральні залежності [11] використовуються для опису послідовності дій процесу формування рішення в інтелектуальній системі в цілому [12, 13] та формування нових версій процесу на основі ймовірнісного виводу [14]. Використання темпоральних залежностей для побудови пояснень з урахуванням змін вимог користувачів запропоновано в [15].

Каузальні залежності визначають причинно-наслідкові зв'язки між окремими діями, а також між послідовністю дій та отриманим рішенням. Крім того, каузальні залежності відображають вплив значень вхідних змінних на результат роботи інтелектуальної системи [16].

Поєднання темпоральних та каузальних залежностей для побудови пояснень запропоновано в роботі [17]. Однак задача деталізації пояснень в даній роботі не розглядалась.

Таким чином, існуючі підходи до побудови пояснень орієнтовані на визначення впливу окремих факторів на отримане рішення. Однак комплексному підходу, в якому розглядалися би причини рішення в цілому та причини окремих дій процесу прийняття рішення не приділялось достатньо уваги. Тому актуальною задачею є розробка підходу до побудови пояснень в інтелектуальних системах на основі інтеграції темпоральних та каузальних залежностей щодо процесу прийняття рішення для

заданого рівня деталізації.

Це дає можливість сформулювати пояснення, які розкривають як загальну логіку функціонування інтелектуальної системи, так і причини прийняття конкретних рішень.

Метою статті є розробка підходу до побудови пояснень на основі інтеграції темпоральних та каузальних залежностей щодо процесу прийняття рішення з тим, щоб забезпечити можливість формування пояснення як для зовнішніх, так і для внутрішніх користувачів інтелектуальних інформаційних систем.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі задачі:

- визначення відмінностей доступу до інформації в ІС для зовнішніх та внутрішніх користувачів;
- розробка ієрархічної моделі пояснення на базі темпоральних та каузальних залежностей;
- розробка методу побудови пояснень з використанням темпоральних та зважених каузальних залежностей.

Відмінності доступу користувачів до інформації в ІС

Вимоги користувачів до пояснень визначаються на основі особливостей задач, які вирішують внутрішні та зовнішні користувачі інтелектуальних систем. Ключова відмінність між цими користувачами полягає у рівні доступу до інформації про структуру та процес функціонування ІС.

Внутрішні користувачі – це фахівці, які безпосередньо залучені до розробки, навчання, тестування та підтримки інтелектуальної системи. До цієї категорії належать інженери машинного навчання, фахівці з аналізу даних, команда підтримки, а також, в деяких випадках, розробники програмного забезпечення. Внутрішні користувачі мають частковий доступ до інформації про архітектуру системи, використані алгоритми та моделі, процес обробки даних та прийняття рішень. Тобто для них інтелектуальна система представлена у вигляді «сірої скриньки».

Зовнішні користувачі використовують результати роботи інтелектуальної системи для вирішення своїх задач. Вони можуть бути експертами в предметній області, для якої застосовується система, проте зазвичай не мають глибоких знань в сфері інтелектуальних технологій.

Для зовнішніх користувачів система виглядає як «чорна скринька». Вони мають можливість надавати вхідні дані та отримувати рішення ІС, але внутрішня структура процесу обробки інформації є для них прихованою.

Таким чином, в залежності від рівня доступу до інформації в інтелектуальних інформаційних системах, внутрішні та зовнішні користувачі мають різне розуміння щодо того, як саме інтелектуальна система формує свої висновки. Внутрішні користувачі можуть аналізувати проміжні результати, налаштовувати параметри алгоритмів, модифікувати навчальні вибірки тощо. Зовнішні користувачі оперують

лише вхідними даними та вихідними рішеннями, не маючи можливості безпосередньо вплинути на хід обробки інформації всередині системи.

Ієрархічна модель пояснення на базі темпоральних та каузальних залежностей

З огляду на відмінності в доступі до інформації для внутрішніх і зовнішніх користувачів, запропоновано ієрархічну модель пояснення рішень інтелектуальної інформаційної системи.

Розроблена модель враховує представлення системи як вигляді «сірої», так і у вигляді «чорної» скриньки, що створює умови для інтерпретації процесу формування рішення з різним ступенем деталізації.

Модель P містить три рівні пояснення: локальний P_l , процесний P_π та глобальний P_g , причому локальний задає обмеження на можливі реалізації процесу формування рішення.

$$P = P_g : \exists P_\pi | P_l. \quad (1)$$

Локальний рівень пояснення P_l призначений для внутрішніх користувачів. На даному рівні пояснення будуються з використанням темпоральних залежностей s_m^{m-n} між $m-n$ та m станами процесу формування рішення, що відображають послідовність дій із досягнення рішення в ІС.

Обмеження у виразі (1) задаються через каузальні правила-обмеження, які виконуються для всіх відомих i – реалізацій процесу прийняття рішень. Тобто такі темпоральні залежності s_m^{m-n} існують при будь-якому відомому виконанні процесу формування рішення :

$$P_l = \{s_m^{m-n} | (\exists m, n) : (\forall i) \exists s_m^{m-n}\}. \quad (2)$$

Пояснення на основі обмеження на локальному рівні дає можливість виявити «вузькі місця» в роботі інтелектуальної системи.

Процесний рівень також орієнтований на внутрішніх користувачів. Пояснення на цьому рівні містять інформацію про послідовність дій що привела до формування певного класу схожих рішень. Така послідовність дій задається через темпоральні залежності s_m^{m-n} :

$$P_\pi = \langle s_2^1, \dots, s_m^{m-n}, \dots \rangle \Rightarrow Y. \quad (3)$$

На базі темпоральних формуються зважені каузальні залежності w_m^{m-n} і тоді пояснення приймає вигляд:

$$P_\pi = \langle w_2^1, \dots, w_m^{m-n}, \dots \rangle \Rightarrow Y. \quad (4)$$

Пояснення процесного рівня дають можливість виявити загальні закономірності роботи інтелектуальної системи.

Глобальний рівень пояснення орієнтований на зовнішніх користувачів.

На цьому рівні система представлена у вигляді "чорної скриньки", а пояснення будуються на основі

зважених каузальних залежностей, що визначають причинно-наслідковий зв'язок w_Y^X між вхідними даними та фінальним рішенням:

$$P_\pi = w_Y^X. \quad (5)$$

Такі пояснення Дають можливість обґрунтувати результат роботи системи в термінах опису вхідних даних та результату без деталізації внутрішніх процесів обробки даних в ІС.

Між рівнями моделі існують ієрархічні зв'язки. Темпоральні залежності локального рівня представляють собою складові процесних пояснень. Процесні пояснення розкривають деталі формування глобальних каузальних залежностей, що зв'язують вхідні дані з отриманим в інтелектуальній системі рішенням.

Темпоральні залежності відіграють ключову роль в запропонованій моделі, оскільки вони безпосередньо відображають впорядкованість станів інтелектуальної системи в процесі обробки даних та формування рішень. На основі цих залежностей в подальшому формуються каузальні залежності більш високого рівня.

Каузальність в даному контексті можна визначити як причинно-наслідковий зв'язок між певними факторами (наприклад, значеннями вхідних даних або послідовністю виконання дій процесу формування рішення) та результатом роботи системи.

Наявність повторюваних темпоральних залежностей, що спостерігаються для всіх відомих реалізацій процесу прийняття рішень, дає підстави стверджувати про наявність каузального зв'язку між відповідними станами чи діями системи.

Тобто повторюваність певних патернів в упорядкованості станів є ознакою причинно-наслідкових відношень.

Ваги каузальних залежностей в запропонованій моделі визначаються з використанням різних підходів для кожного рівня пояснення. На локальному рівні ваги правил-обмежень приймаються рівними 1, оскільки ці правила виконуються для всіх відомих варіантів процесу формування рішення.

На процесному та глобальному рівнях для визначення ваг залежностей застосовується математичний апарат теорії можливостей [18]. Ця теорія, розроблена Лотфі Заде, оперує оцінками можливості та необхідності настання певних подій.

Можливість в теорії можливостей трактується як ступінь правдоподібності певної події (наприклад, причини рішення) за відсутності доказів її неможливості.

Необхідність, в свою чергу, відображає міру впевненості в настанні події з огляду на наявні вхідні дані.

З позицій оцінювання ваг каузальних залежностей можливість характеризує потенційну здатність певного фактору впливати на результат роботи ІС, а необхідність вказує на обов'язковість врахування цього фактору для коректного формування рішення.

Спільне використання оцінок можливості та необхідності дозволяє більш гнучко описувати

причинно-наслідкові зв'язки порівняно з класичними ймовірнісними моделями, зокрема з урахуванням невизначеності, неповноти та неточності інформації щодо процесу прийняття рішення при представленні ІС у вигляді «сірої» або «чорної» скриньки.

Метод побудови пояснень з використанням темпоральних та зважених каузальних залежностей

Метод побудови багаторівневого представлення пояснення для інтелектуальних систем на основі темпоральних та каузальних залежностей містить дві основних фази:

- формування пояснення;
- представлення пояснення.

Фаза 1. Формування пояснення.

Дана фаза передбачає створення пояснення на локальному, процесному та глобальному рівнях деталізації.

Еман 1.1. Побудова пояснень локального рівня деталізації.

На локальному рівні пояснення будуються шляхом послідовного формування темпоральних та каузальних залежностей між станами процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі згідно представленню (2).

Крок 1.1.1. Формування темпоральних залежностей.

Темпоральні залежності задають порядок у часі для станів процесу формування рішення. При побудові таких залежностей використовується відносний час, що дає можливість порівняти темпоральну упорядкованість для декількох реалізацій процесу формування рішення.

На даному кроці формуються темпоральні залежності X та F типу [11]. Перші задають порядок для двох послідовних станів процесу, наприклад для першого та другого станів залежність позначається як s_2^1 . Другі задають порядок для станів, між якими є проміжні стани.

Наприклад для першого та третього станів формується залежність s_3^1 .

Результатом даного кроку є множина темпоральних залежностей виду:

$$P_i = \{s_2^1, s_3^1, s_4^1, \dots, s_3^2, s_4^2, \dots\}. \quad (6)$$

Крок 1.1.2. Формування каузальних залежностей. Каузальні залежності на даному рівні деталізації визначаються як темпоральні залежності, які виконуються для всіх варіантів (реалізацій) процесу прийняття рішення. На даному кроці порівнюються всі відомі i – варіанти виконання процесу. Якщо така умова задовольняється, то вага залежності w_m^{m-n} встановлюється рівною одиниці:

$$(\forall i) \exists s_m^{m-n} \Rightarrow w_m^{m-n} = 1. \quad (7)$$

Результатом етапу є множина темпоральних залежностей s_m^{m-n} та підмножина каузальних залежностей, що мають одиничну вагу.

Перші виступають як елементи побудови процесного рівня пояснення, а другі – як обмеження даного рівня.

Еман 1.2. Побудова пояснень процесного рівня деталізації.

На процесному рівні аналізується сукупність темпоральних залежностей, які відображають порядок станів у поточному процесі формування рішення в інтелектуальній системі.

Каузальні залежності на цьому рівні формуються з темпоральних з використанням математичного апарату теорії можливостей, що дозволяє оцінити ступінь впевненості у наявності причинно-наслідкового зв'язку між станами на основі частоти спостереження відповідної темпоральної залежності у різних реалізаціях процесу прийняття рішення.

Еман 1.3. Побудова пояснень глобального рівня деталізації.

На глобальному рівні визначаються каузальні залежності між вхідними даними інтелектуальної системи та отриманим рішенням згідно (5).

Ваги цих залежностей також обчислюються з використанням оцінок можливості та необхідності в рамках теорії можливостей [18].

Це дозволяє врахувати невизначеність щодо впливу окремих вхідних факторів на кінцевий результат.

Фаза 2. Формування представлення пояснення.

Фаза формування представлення пояснення складається з п'яти етапів, які забезпечують вибір та деталізацію пояснень для користувача інтелектуальної системи.

Еман 2.1. Формування множини альтернативних пояснень.

На першому етапі формується множина альтернативних пояснень на основі каузальних залежностей, отриманих на попередній фазі.

Ці пояснення впорядковуються за вагою, яка відображає ступінь впевненості у причинно-наслідкових зв'язках.

Еман 2.2. Оцінка пояснень за критеріями якості.

На другому етапі виконується оцінка сформованих пояснень.

Зокрема, на даному етапі перевіряється складність пояснень. Також виконується оцінка коректності та чутливості пояснень. Перша відображає ступінь відповідності пояснення реальному процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі. Друга відображає ступінь зміни пояснення при зміні вхідних даних або параметрів моделі.

Еман 2.3. Відбір пояснень.

На третьому етапі здійснюється відбір коректних пояснень, які мають максимальну вагу та відповідають встановленим критеріям чутливості та складності. Це дозволяє обрати релевантні та зрозумілі для користувача пояснення.

Еман 2.4. Деталізація пояснень за об'єктами, з якими оперує процес формування рішення в ІС.

На четвертому етапі відібрані пояснення, за потреби, деталізуються шляхом встановлення зв'язків

між каузальними залежностями та об'єктами, які використовує процес формування рішення [19].

Це дозволяє користувачу краще зрозуміти вплив конкретних сутностей предметної області на логіку формування рішення.

Етап 2.5. Доповнення пояснень вхідними та проміжними даними.

На п'ятому етапі каузальні залежності, що утворюють пояснення, доповнюються вхідними даними, які були використані при формуванні відповідних станів процесу прийняття рішення.

Такий підхід забезпечує можливість інтерпретації пояснень та дозволяє користувачу встановити зв'язок між вхідними даними, діями та отриманим результатом.

Розглянемо реалізацію фази 1 даного методу для побудови пояснення щодо рекомендацій в системі електронної комерції.

Нехай у процесі формування рекомендацій користувачеві спостерігаються наступні стани: c_1 – користувач переглядає сторінку товару «Смартфон Samsung Galaxy S21»; c_2 – користувач додає товар «Смартфон Samsung Galaxy S21» до кошика; c_3 – Користувач оформлює замовлення на товар «Смартфон Samsung Galaxy S21».

На першому етапі формується темпоральні залежності s_2^1, s_3^1, s_3^2 між цими станами. Оскільки ці залежності є характерними для всіх користувачів, які купують даний товар, то $w_2^1 = w_3^1 = w_3^2 = 1$, тобто дані залежності є каузальними правилами-обмеженнями.

На другому етапі формується процес із послідовності каузальних залежностей s_2^1, s_3^2 , що визначають послідовний перехід від першого до другого, а потім до третього стану, а також залежності s_3^1 , що визначає обов'язкову наявність c_3 в майбутньому після c_1 . Цей фрагмент процесу є детермінованим, оскільки правила s_2^1, s_3^2 та s_3^1 виступають в якості обмежень.

На другій фазі визначаються атрибути станів $c_1 - c_3$ і пояснення деталізується з урахуванням об'єктів, до яких належать ці атрибути.

На глобальному рівні деталізації пояснення визначаються каузальні залежності між характеристиками користувача (вік, стать, місто проживання) та фактом купівлі товару «Смартфон Samsung Galaxy S21».

Розраховується значення можливості і відбирається пояснення з найбільшим значенням можливості.

Зокрема, пояснення виду «Користувачі чоловічої статі віком 25-40 років часто купують смартфон Samsung Galaxy S21 після його перегляду та додавання у кошик».

Висновки

З метою обґрунтування необхідності багаторівневої деталізації пояснень виконано структурування відмінностей доступу до інформації користувачів інтелектуальних систем.

Показано, що внутрішні користувачі мають частковий доступ до внутрішньої інформації щодо процесу прийняття рішення, що потребує відповідної деталізації пояснень.

Запропонована ієрархічну модель пояснення на основі темпоральних та каузальних залежностей, яка містить локальний, процесний та глобальний рівні пояснень згідно можливостей доступу користувачів до інформації щодо процесу формування рішення в інтелектуальній системі.

Локальний та процесний рівні орієнтовані на внутрішніх користувачів і передбачають більш детальний аналіз роботи системи як "сірої скриньки". Глобальний рівень призначений для зовнішніх користувачів і надає узагальнені пояснення при представленні системи у вигляді "чорної скриньки". Темпоральні залежності визначають порядок дій процесу формування рішення. На їх основі формується зважені каузальні залежності.

Модель дозволяє врахувати невизначеність та неповноту інформації при поясненні рішень інтелектуальних систем для зовнішніх та внутрішніх користувачів.

Запропоновано метод побудови пояснень з використанням темпоральних та каузальних залежностей між станами або діями процесу формування рішення в інтелектуальній системі.

Метод містить фази формування та представлення пояснень. Метод дозволяє сформувати каузальні залежності на декількох рівнях деталізації та представити їх користувачу у вигляді упорядкованої за вагою множини альтернативних пояснень.

Деталізація пояснень з урахуванням властивостей об'єктів, що використовуються у процесі формування рішення, а також доповнення пояснень на основі каузальних залежностей вхідними даними сприяє кращому розумінню користувачем логіки роботи інтелектуальної системи.

REFERENCES

- Castelvecchi, D. (2016). Can we open the black box of AI? *Nature*, 538(7623), 20-23. <https://doi.org/10.1038/538020a>.
- Miller, T. (2019). Explanation in artificial intelligence: Insights from the social sciences. *Artificial Intelligence*, 267, 1-38. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2018.07.007>.
- Gunning, D., & Aha, D. (2019). DARPA's explainable artificial intelligence (XAI) program. *AI Magazine*, 40(2), 44-58. <https://doi.org/10.1609/aimag.v40i2.2850>.
- Tintarev, N., & Masthoff, J. (2007). A survey of explanations in recommender systems. In *IEEE 23rd International Conference on Data Engineering Workshop* (pp. 801-810). <https://doi.org/10.1109/ICDEW.2007.4401070>.
- Pearl, J. (2009). *Causality: Models, Reasoning and Inference* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511803161>.

6. Chalyi, S., & Leshchynskyi, V. (2020). Temporal representation of causality in the construction of explanations in intelligent systems. *Advanced Information Systems*, 4(3), 113-117. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.3.16>.
7. Adadi, A., & Berrada, M. (2018). Peeking inside the black-box: A survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI). *IEEE Access*, 6, 52138-52160. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2870052>.
8. Ribeiro, M. T., Singh, S., & Guestrin, C. (2016). "Why should I trust you?" Explaining the predictions of any classifier. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 1135-1144). <https://doi.org/10.1145/2939672.2939778>.
9. Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. In *Advances in Neural Information Processing Systems* (pp. 4765-4774). <https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/hash/8a20a8621978632d76c43dfd28b67767-Abstract.html>
10. Selvaraju, R. R., Cogswell, M., Das, A., Vedantam, R., Parikh, D., & Batra, D. (2017). Grad-cam: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision* (pp. 618-626). <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.74>
11. Chala, O. (2018). Models of temporal dependencies for a probabilistic knowledge base. *Econtechmod. An International Quarterly Journal*, 7(3), 53-58.
12. Chala, O. (2019). Development of information technology for the automated construction and expansion of the temporal knowledge base in the tasks of supporting management decisions. *Technology Audit and Production Reserves*, 1/2(45), 9-14. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.160205>.
13. Levykin V., Chala O. Development of a method of probabilistic inference of sequences of business process activities to support business process management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 5/3(95). P. 16-24. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.142664.
14. Чала О. В. (2020) Модель узагальненого представлення темпоральних знань для задач підтримки управлінських рішень. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Системний аналіз, управління та інформаційні технології. № 1(3). С. 14-18. DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.03.
15. Chalyi, S., & Leshchynskyi, V. (2020). Method of constructing explanations for recommender systems based on the temporal dimension of user choice. *EUREKA: Physics and Engineering*, (3), 43-50. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001228>.
16. Чалий, С. Ф., & Лещинський, В. О. (2023). Можливісна модель каузального зв'язку по вхідній змінній для побудови пояснення в інтелектуальній системі. *Системи управління, навігації та зв'язку*, (1(71)), 102-106. <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/3066>.
17. Chalyi, S., & Leshchynskyi, V. (2020). Temporal representation of causality in the construction of explanations in intelligent systems. *Advanced Information Systems*, 4(3), 113-117. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.3.16>.
18. Dubois, D., & Prade, H. (2011). Possibility theory and its applications: Where do we stand? In *Springer handbook of computational intelligence* (pp. 31-60). Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.3.16>.
19. Chalyi, S., & Leshchynskyi, V. (2022). Temporal representation of the essences of the subject area for the construction of explanations in intelligent systems. *Intelligent Information Systems*, 1-10.

Received (Надійшла) 10.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.11.2024

Modeling explanations in intelligent systems based on the integration of temporal and causal dependencies

S. Chalyi, V. Leshchynskyi

Abstract. The article's subject matter is the processes of constructing explanations in intelligent systems using temporal and causal dependencies. The aim is to develop an approach to constructing explanations based on the integration of temporal and causal dependencies regarding the decision-making process in order to provide the possibility of forming explanations for both external and internal users of intelligent information systems. **Tasks:** determining the differences in access to information in IIS for external and internal users; developing a hierarchical model of explanation based on temporal and causal dependencies; developing a method for constructing explanations using temporal and causal dependencies. **The approaches used are:** methods of constructing explanations, methods of constructing causal dependencies. The following **results** were obtained. The structuring of the differences in access to information of users of intelligent systems was performed to justify the need for multilevel detailing of explanations. A hierarchical model of explanation based on temporal and causal dependencies is proposed. A method for constructing explanations using temporal and causal dependencies between states or actions of the decision-making process in an intelligent system is proposed. **Conclusions.** The scientific novelty of the obtained results is as follows. A hierarchical model of explanation is proposed, which contains local, process, and global levels of explanations according to the possibilities of user access to information about the decision-making process, which makes it possible to take into account the incompleteness of information about the state of the intelligent system when explaining its decisions for external and internal users. A method for constructing explanations has been developed, which contains the phases of constructing explanations using temporal and causal dependencies between input data, states of the decision-making process, and the obtained result, and presenting explanations, which makes it possible to form causal dependencies at several levels of detail and present them to the user in the form of an ordered by weight set of alternative explanations.

Keywords: intelligent system, artificial intelligence system, explanation, decision-making process, temporal dependencies, causal dependencies, causality, possibility.

А. С. Янко, А. Д. Глушко, О. І. Крук, А. Ю. Прокудін

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ КОРЕКЦІЇ ДАНИХ У СИСТЕМІ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ

Анотація. У статті розглядаються вплив коригувальних здібностей непозиційних кодових структур (НКС), які представлені взаємно не простими основами системи залишкових класів (СЗК). На даний час такі НКС досліджені достатньо поверхнево та описуються скоріше якісно, ніж кількісно. До теперішнього часу практично не проводилось ґрунтовних досліджень коригувальних властивостей НКС СЗК, що мають основи, які не являються взаємно простими числами. Аналогічна система також має значні коригувальні можливості, що обумовлює необхідність оцінки можливості та доцільності застосування НКС, представлених у вигляді взаємно не простих основ для підвищення достовірності обчислень комп'ютерних систем (КС). З метою подальшого дослідження та розвитку даних НКС розглянемо ряд наукових тверджень, використання результатів яких дозволить більш повно дослідити коригувальні властивості НКС з взаємно не простими основами. Розроблено алгоритми процесів корекції та контролю даних у СЗК з взаємно попарно не простими основами. Використання цих алгоритмів спрощує процес виявлення і виправлення одиничних помилок. Зазначимо, що за простотою конструкції схем декодувальних пристроїв розглянутих НКС, не мають аналогів у позиційних системах числення. Це досягається за рахунок обмеження класу можливих коригованих помилок шляхом введення додаткової апаратурної надлишковості представлення НКС в СЗК.

Ключові слова: взаємно не прості основи; виправлення помилок; комп'ютерна систем; корекція даних; коригувальні властивості; система залишкових класів.

Вступ

Відомо, що в непозиційній системі числення в залишкових класах широке розповсюдження отримали коригувальні коди, тобто непозиційні кодові структури (НКС), що представлені набором взаємно простих основ даної системи залишкових класів (СЗК) [1]. Це обумовлено простотою формування структури цих НКС, високою ефективністю їх коригувальних властивостей, а також відносною легкістю побудови для мінімальної кодової відстані, яка буде задана [2]. У рамках даного дослідження розглянуті коригувальні НКС з взаємно не простими основами. Відсутність ґрунтовних досліджень використання коригувальних можливостей даних НКС значно обмежує ефективність та сферу використання СЗК. Дана обставина обумовлює необхідність оцінки можливості та доцільності застосування НКС, основи яких є взаємно не простими числами для підвищення достовірності обчислень комп'ютерних систем (КС).

З метою подальшого дослідження розглянемо низку наукових тверджень (НТ), використання результатів яких дозволить більш повно дослідити коригувальні властивості НКС з взаємно не простими основами СЗК. На основі доведення яких розробляється набір ефективних алгоритмів корекції даних, представлених у СЗК.

Алгоритми виявлення та виправлення помилок у СЗК

Лема 1. Для будь-якого НКС $E = (e_1 \parallel e_2 \parallel \dots \parallel e_m)$ в СЗК з основами k_g ($g = \overline{1, m}$) і для будь-якої пари основ k_g і k_i повинна виконуватись умова $(e_g - e_i) \equiv 0 \pmod{x_{gi}}$, де $x_{gi}(k_g, k_i)$ найбільший спільний дільник основ (модулів) k_g та k_i , а $g, i = \overline{1, m}$; $g \neq i$ [3]. Отже, за результатами леми 1,

для визначення необхідних і достатніх умов для виявлення одиничних помилок за допомогою НКС з взаємно не простими основами СЗК сформуємо і доведемо наступне НТ.

НТ 1. Для виявлення помилок у залишку за довільною основою k_g ($g = \overline{1, m}$) НКС $E = (e_1 \parallel e_2 \parallel \dots \parallel e_m)$, заданої основами k_1, \dots, k_m , необхідно, щоб основа k_g мала принаймні один, відмінний від одиниці, спільний дільник з іншими основами k_g ($g \neq i$) [4].

Доведення. Нехай найбільший спільний дільник $x_{gi}(k_g, k_i)$ визначений для довільних основ СЗК ($g \neq i$), і помилка сталася за основою k_g , тобто $e_g = e_g + \Delta e_g$.

Покажемо, що вираз $(e_g - e_i) \pmod{x_{gi}}$ еквівалентний $\Delta e_g \pmod{x_{gi}}$. Згідно з лемою 1, виконується таке рівність $(e_g - e_i) \equiv 0 \pmod{x_{gi}}$. Запишемо вираз $e_g + \Delta e_g = e_g \pmod{k_g}$ у вигляді $e_g + \Delta e_g = k \cdot k_g + e_i$, де k – ціле число. Для визначення спотвореного залишку використаємо останній вираз $e_i = e_i + \Delta e_i - k \cdot k_i$. Тоді можемо записати, що $e_g - e_i = [(e_g - e_i) + (-k h x_{gi}) + \Delta e_g]$.

Так, як $(e_g - e_i) \equiv 0 \pmod{x_{gi}}$ та $-k h x_{gi} \equiv 0 \pmod{x_{gi}}$, де $k_g = h x_{gi}$, а h – натуральне число, яке виконує таке порівняння $(e_g - e_i) \equiv \Delta e_g \pmod{x_{gi}}$. Безумовно, що при відсутності спільних дільників, якщо $x_{gi} = 1$, маємо, що $\Delta e_g \equiv 0 \pmod{x_{gi}}$, що доводить необхідну умову НТ 1, якщо помилка не кратна дільнику x_{gi} . Дійсно, $(k x_{gi} + e_i) \not\equiv 0 \pmod{x_{gi}}$, для $0 < e_{gi} < x_{gi}$.

НТ 1 можна сформулювати таким чином. Для виявлення одиничної помилки (у залишку за довільною основою k_g) НКС $E = (e_1 \parallel e_2 \parallel \dots \parallel e_m)$ необхідно і достатньо, щоб помилка була не кратна дільникам x_{gi} та x_g , де x_g – найменше спільне кратне дільників $x_g = (x_{g1}, x_{g2}, \dots, x_{gm})$.

На основі результатів НТ 1 сформуємо алгоритм (порядок) визначення одиничної помилки.

1. Здійснюємо перевірку залишку за основою k_g . З цією метою визначаємо сукупність значень: $e_1 - e_2 = e_{12} \pmod{x_{12}}$, $e_1 - e_3 = e_{13} \pmod{x_{13}}$, ..., $e_1 - e_m = e_{1m} \pmod{x_{1m}}$. Якщо $e_{1g} = e_{1g} \pmod{x_{1g}}$, тоді здійснюється перевірка другого залишку і т. д.

2. З метою визначення значень e_{gi} ($g \neq i$) необхідно утворити матрицю такого виду:

$$A = \begin{pmatrix} e_{12} & e_{13} & \dots & e_{1m} \\ e_{21} & e_{23} & \dots & e_{23} \\ & & \dots & \\ e_{m1} & e_{m2} & \dots & e_{mm-1} \end{pmatrix}$$

Під час складання матриці A не обов'язково вказувати справжнє числове значення e_{gi} , достатньо представити й використовувати його відмінну ознаку:

$$e_{gi} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } e_g - e_i = 0 \pmod{x_{gi}}, \\ 1, & \text{якщо } e_g - e_i \neq 0 \pmod{x_{gi}}. \end{cases}$$

3. Якщо визначник матриці $|A| = 0$, то НКС $E = (e_1 \parallel e_2 \parallel \dots \parallel e_m)$ – правильна, а якщо $|A| \neq 0$, то E – неправильна.

Розглянемо деякі теоретичні основи, що дають можливість спростити наведений вище алгоритм.

Враховуючи, що

$$e_g - e_i \equiv [x_{gi} - (e_g - e_i)] \pmod{x_{gi}},$$

визначник $|A|$ можна не знаходити. У цьому випадку достатнім є визначення діагональних елементів матриці A та додавання одного додаткового значення. e_{m1} , а саме $e_{12}, e_{23}, e_{34}, \dots, e_{m-1m}, e_{m1}$.

Достатньо легко підтвердити, що за таких значень e_{gi} , можна виявити не тільки сам факт викривлення НКС, але й визначити локалізацію (номер) спотвореного залишку.

Для встановлення необхідних умов для проведення процедури виправлення одиничних помилок за допомогою НКС з взаємно не простими основами СЗК сформулюємо і доведемо наступне НТ.

НТ 2. Для виправлення помилки в залишку з довільною основою числа $E = (e_1, e_2, \dots, e_m)$, заданої в СЗК з основами k_1, k_2, \dots, k_m , необхідно, щоб виконувалась умова:

$$(x_{gh} - 1)(x_{gi} - 1) \geq k_g - 1 - (L_{x_{gh}} + L_{x_{gi}} - L_{x_{gh}, x_{gi}}), \quad (1)$$

де $x_{gh} = (k_g, k_h)$, $x_{gi} = (k_g, k_i)$; $L_{x_{gh}}$ – кількість дільників, кратних x_{gh} ; $L_{x_{gi}}$ – кількість дільників, кратних x_{gi} ; $L_{x_{gh}, x_{gi}}$ – кількість дільників, кратних найменшому спільному кратному $[x_{gh}, x_{gi}]$ дільників x_{gh} та x_{gi} , $g \neq i$.

Доведення. Обчислимо значення e_{gi} , e_{gh} , e_{ih} .

Якщо помилка сталася за основою k_g , то $e_{gh} = 0$, а $e_{gi} \neq 0$ та $e_{gh} \neq 0$. Кількість різних комбінацій e_{gi} , e_{gh} рівно $(x_{gi} - 1) \cdot (x_{gh} - 1)$, де $(x_{gi} - 1)$ – число можливих значень величини e_{gi} ($e_{gi} \neq 0$), $(x_{gh} - 1)$ – число можливих значень e_{gh} ($e_{gh} = 0$), а число можливих помилок за основою k_g рівно $k_g - 1$ ($\Delta e_g \neq 0$) з урахуванням кількості невиявлених помилок. Кількість невиявлених помилок складається з кількості помилок, кратних дільнику $x_{gh} - L_{x_{gh}}$.

Таким чином, кількість можливих значень виявлених помилок дорівнює значенню $k_g - 1 - (L_{x_{gh}} + L_{x_{gi}} - L_{x_{gh}, x_{gi}})$.

З метою забезпечення відповідності потенційним значенням помилок за основою k_g необхідно виконання нерівності (1), що було потрібно довести.

Необхідна умова НТ 2 є достатньою, якщо різними значеннями помилок Δe_g відповідають різні значення добутку $e_{gh} \cdot e_{gi}$, і навпаки. В цьому контексті існує однозначна відповідність між можливими значеннями та значеннями добутку $e_{gh} \cdot e_{gi}$, що дозволяє точно визначити величину помилки. Враховуючи НТ 2, складемо алгоритм корекції помилок за довільною основою k_g :

1. Встановимо номер спотвореного залишку. З цією метою розрахуємо значення:

$$e_1 - e_2 = e_{12} \pmod{x_{12}},$$

$$e_2 - e_3 = e_{23} \pmod{x_{23}},$$

...

$$e_{m-1} - e_m = e_{m-1m} \pmod{x_{m-1m}},$$

$$e_m - e_1 = e_{m1} \pmod{x_{m1}}.$$

Якщо всі залишки $e_{gi} = 0 \pmod{x_{gi}}$, то НКС E правильна. Якщо помилка сталася за основою k_g , то $x_{gi} \neq 0$ та $e_{gh} \neq 0$ таким чином, перевірна НКС $E = (e_1 \parallel e_2 \parallel \dots \parallel \tilde{e}_g \parallel \dots \parallel e_m)$ є неправильною.

2. За значенням e_{gi} та e_{gh} звертаємось до блоку констант помилок, де обираємо відповідне значення Δe_g .

3. Виконуємо корекцію числа E у залишку e_g , і отримуємо правильне число $E = E - \Delta E$, тобто $E = (e_1 \parallel e_2 \parallel \dots \parallel e_g \parallel \dots \parallel e_m)$.

Якщо в СЗК через виключення основи, що призвела до помилки, є можливість однозначно представити НКС E , то замість визначення величини помилки Δe_g за значеннями e_{gi} та e_{gh} , можемо безпосередньо обчислити значення коректного залишку e_g . Далі розглянемо алгоритм (порядок) корекції помилок.

1. Розрахуємо значення залишків $e_{12}, e_{23}, \dots, e_{m1}$.

2. З'ясуємо номер спотвореного залишку. Вважаємо, що помилка сталася за основою k_g . Відповідно цю основу необхідно виключити, а НКС E слід представити за основами k_1, k_2, \dots, k_m , тобто:

$$E = (e_1 \parallel e_2 \parallel \dots \parallel e_{g-1} \parallel e_{g+1} \parallel \dots \parallel e_m).$$

3. Виконаємо згортання НКС E в позиційний код.

4. Визначимо справжнє значення спотвореного залишку за відомою формулою:

$$e_g = E - \left[E / k_g \right] k_g,$$

де $[y]$ – ціла частина y , що не перевищує y . Виправлена НКС:

$$E_{\text{вип}} = (e_1 \parallel e_2 \parallel \dots \parallel e_g \parallel \dots \parallel e_m).$$

Визначимо умови, які дозволяють виключити деякі основи з СЗК. З цією метою основи вихідної СЗК представимо у канонічній формі

$$k_1 = \varphi_{11}^{e_{11}} \varphi_{12}^{e_{12}} \dots \varphi_{1h}^{e_{1h}},$$

$$k_2 = \varphi_{21}^{e_{21}} \varphi_{22}^{e_{22}} \dots \varphi_{2j_2}^{e_{2j_2}},$$

...

$$k_m = \varphi_{m1}^{e_{m1}} \varphi_{m2}^{e_{m2}} \dots \varphi_{mj_m}^{e_{mj_m}},$$

$$K = \varphi_1^{e_1} \varphi_2^{e_2} \dots \varphi_h^{e_h}.$$

Для однозначного визначення НКС E в СЗК з основами k_1, k_2, \dots, k_m , що знаходиться у діапазоні $[0, K)$, слід виключити лише основи, для яких $\varphi_k = \varphi_{g_j}$, ($k = \overline{1, h}$, $g = \overline{1, m}$). При цьому необхідно, щоб $e_k \geq e_{g_j}$.

Таким чином, встановлено необхідні та достатні умови для корекції помилок шляхом виключення спотвореної основи.

Ці умови передбачають одночасне виконання специфічної рівності та нерівності:

$$\varphi_k = \varphi_{g_j}, \quad e_k \geq e_{g_j}. \quad (2)$$

Розглянемо СЗК представлену основами $k_1 = 4$, $k_2 = 6$, $k_3 = 12$, $k_4 = 18$. При цьому $K = [4, 6, 12, 18] = 36$. Відповідно до умови (2), що визначає можливість корекції помилок, визначимо основи СЗК, які підлягають виключенню. Основи СЗК представимо у канонічній формі: $k_1 = 2^2$, $k_2 = 2 \cdot 3$, $k_3 = 2^2 \cdot 3$, $k_4 = 2 \cdot 3^2$ та $K = 2^2 \cdot 3^2$.

Очевидно, що шукані основи будуть такі $k_1, k_2, \overline{a} k_3$. Виконаємо перевірку, для чого складемо часткові значення найменших спільних кратних:

$$K_1 = [6, 12, 18] = 36,$$

$$K_2 = [4, 12, 18] = 36,$$

$$K_3 = [4, 6, 18] = 36;$$

$$K_4 = [4, 6, 12] = 12.$$

Часткове значення найменшого спільного кратного $K_4 < 36$, що підтверджує правильність визначення виключених основ СЗК.

Вище було представлено алгоритм виявлення та виправлення помилок у СЗК за допомогою НКС з взаємно не простими основами. Вважаємо, що при обчисленні значень $(e_h - e_{h+1}) \bmod x_{hh+1}$ встановлено, що $e_{g-1g} \neq 0$, $e_{g+1g} \neq 0$, а всі інші значення дорівнюють $e_{hh+1} = (e_h - e_{h+1}) \bmod x_{hh+1} = 0$. Тоді стверджується, що НКС E неправильна, а помилка присутня у залишку за основою k_g , тобто $E = (e_1 \parallel e_2 \parallel \dots \parallel \tilde{e}_g \parallel \dots \parallel e_m)$.

Звертаючись до значень e_{g-1g} і e_{g+1g} у блоці констант помилок, обчислимо значення помилки Δe_g , після чого визначимо правильне значення залишку $e_{g_{\text{вип}}} = \tilde{e}_g - \Delta e_g$. Виправлене число буде презентоване у вигляді $E_{\text{вип}} = (e_1 \parallel e_2 \parallel \dots \parallel e_{g_{\text{вип}}} \parallel \dots \parallel e_m)$. Для успішного виправлення помилки з використанням розробленого методу корекції слід, щоб помилка Δe_g не була кратною одночасно двом дільникам x_{g-1g} та x_{g+1g} , що обмежує клас коригованих помилок.

Метод корекції одиничних помилок, який дозволяє виправляти помилки, які є кратними одному з дільників x_{g-1g} чи x_{g+1g} , складається з наступного. Якщо СЗК задана з взаємно не простими основами, тобто найбільший спільний дільник визначається наступним чином $(k_1, k_2, \dots, k_m) \geq 2$. Визначимо всі значення e_{hh+1} , тобто $e_{12}, e_{23}, e_{34}, \dots, e_{m-1m}, e_{m1}$. Не порушуючи загальності міркувань, будемо вважати, що $e_{g+1g} \neq 0$, а всі інші значення $e_{hh+1} \neq 0$. Так як $e_{g+1g} = (e_g - e_{g+1}) \bmod x_{g+1g} \neq 0$, помилка може бути виявлена лише в залишках за основами k_g або k_{g+1} .

У цьому контексті можна сформулювати дві гіпотези: перша – помилка присутня у залишку e_g , друга – помилка присутня у залишку e_{g+1} . До того як перейти до розгляду процесу корекції помилок за допомогою запропонованим методом, сформулюємо та доведемо наступну теорему НТ 3. Результати цього доведення будуть застосовані для визначення процесу збіжності сукупності НКС вигляду $E^{(h_g)} = (e_1 \parallel \dots \parallel e_{g-1} \parallel e_{g_{h_g}} \parallel e_{g+1} \parallel \dots \parallel e_m)$ до правильної

НКС $E^{(\omega)} = (e_1 \parallel \dots \parallel e_{g-1} \parallel e_{g\omega} \parallel e_{g+1} \parallel \dots \parallel e_m)$. Попередньо розглянемо наступну лему.

Лема 2. Різниця, сума та добуток будь-яких НКС з взаємно не простими основами є кодовим словом [5].

НУЗ. Нехай у впорядкованій $(k_{g-1} < k_g; g = \overline{1, m})$ СЗК з основами k_1, k_2, \dots, k_m задано неправильне (спотворене в одному залишку) число $E = (e_1 \parallel e_2 \parallel \dots \parallel e_{g-1} \parallel \tilde{e}_g \parallel e_{g+1} \parallel \dots \parallel e_m)$ і нехай $\Delta k_g = \tilde{k}_g - k_g = h_g x_{g-1g}$. Тоді в сукупності значень $e_{gh_g} = (e_g - h_g x_{g-1g}) \bmod k_g$ існує таке єдине значення $e_{g\omega}$, при якому НКС $E^{(\omega)} = (e_1 \parallel e_2 \parallel e_{g\omega} \parallel \dots \parallel e_m)$ є правильною, де $x_{g-1g}(k_{g-1}, k_g)$, а h_g може приймати значення $h_g = 1, 2, \dots, k_g / x_{g-1g} - 1$.

Доведення. Покажемо, що існує таке значення $e_{g\omega}$, при якому НКС $E^{(\omega)} = (e_1 \parallel e_2 \parallel e_{g\omega} \parallel \dots \parallel e_m)$ є не спотвореною (правильною). За умовою теореми помилка Δe_g кратна дільнику x_{g-1g} , вираз $h_g x_{g-1g}$ містить всі можливі числа, кратні x_{g-1g} .

Таким чином, знайдеться принаймні одне значення $h_g = \omega_1$, при якому $\Delta e_{g\omega_1} = \omega_1 x_{g-1g}$ та $e_{1\omega_1} = \tilde{e}_g - \Delta e_{g\omega_1}$. Покажемо, що $E^{(\omega_1)}$ єдине правильна НКС з сукупності НКС виду $E^{(h_g)}$. Вважатимемо, що існує значення $e_{1\omega_2} = \tilde{e}_g - \omega_2 x_{g-1g}$, для якого НКС $E^{(\omega_2)}$ також є правильною. У такому випадку, відповідно до леми 2 НКС $E^{(\omega_1)} - E^{(\omega_2)} = (0 \parallel \dots \parallel e_{g\omega_1} - e_{g\omega_2} \parallel \dots \parallel 0)$ є неспотвореною (правильною). Якщо число $E^{(\omega_1)} - E^{(\omega_2)}$ є правильним, то у відповідності до леми 1 отримаємо:

$$(\omega_2 - \omega_1)x_{g-1g} \equiv 0 \pmod{x_{1-g}},$$

$$(\omega_2 - \omega_1)x_{g-1g} \equiv 0 \pmod{x_{2-g}},$$

...

$$(\omega_2 - \omega_1)x_{g-1g} \equiv 0 \pmod{x_{m-g}}.$$

Якщо $g \neq m$, то єдине правильна НКС $E^{(\omega_1)} - E^{(\omega_2)}$ буде нульове кодове слово. Такий результат зумовлений тим, що $x_{g-1g} \neq 0$ та x_{g-1g} не дорівнює найменшому спільному кратному дільників $x_{1g}, x_{2g}, \dots, x_{mg}$.

При цьому нерівність $x_{g-1g} \neq [x_{1g}, x_{2g}, \dots, x_{mg}]$ спростовує умову довільного вибору основ k_1, k_2, \dots, k_m . Отже, виконується наступне рівняння $E^{(\omega_1)} - E^{(\omega_2)} = (0 \parallel 0 \parallel \dots \parallel 0 \parallel \dots \parallel 0)$. Відповідно, $\omega_1 = \omega_2$, що є об'єктивним твердженням єдиності існування ω_1 , за якого

$$E^{(\omega_1)} = (e_1 \parallel e_2 \parallel \dots \parallel e_{g\omega_1} \parallel \dots \parallel e_m)$$

є правильним значенням, що було потрібно довести.

Сформулюємо алгоритм корекції помилок, який базується на висновках, отриманих у теоремі НТ 3. Почнемо з аналізу першої гіпотези. Так як $e_{g-1g} = 0$, помилка є кратною дільнику x_{g-1g} . Отже, помилка за основою може набувати значень $\Delta e_g = h_g x_{g-1g}$, для $h_g = 1, 2, \dots, k_g / x_{g-1g} - 1$. Обчислимо сукупність значень $e_{gh_g} = (e_g - h_g x_{g-1g}) \bmod k_g$. Якщо в цій сукупності знайдеться таке значення e_{gk} , при якому НКС $E^{(k)} = (e_1 \parallel e_2 \parallel \dots \parallel e_{gk} \parallel \dots \parallel e_m)$ є неспотвореною, то перша гіпотеза є вірною, тобто помилка присутня у залишку за основою k_g . У цьому випадку виправлена НКС $E_{\text{вин}} = E^{(k)}$, де $e_{gk} = (e_g - k x_{g-1g}) \bmod k_g$. Якщо при всіх значеннях e_{gh_g} НКС $E^{(h_g)}$ неправильна, то значення e_g є істинним, помилка відбулася в залишку за основою k_{g+1} . Так як $e_{g+1g+2} = 0$, то помилка за основою k_{g+1} кратна дільнику x_{g+1g+2} тобто $\Delta e_{g+1} = h_{g+1} x_{g+1g+2}$, де $h_{g+1} = 1, 2, \dots, k_{g+1} / x_{g+1g+2} - 1$. Далі визначимо сукупність таких значень $e_{g+1h_{g+1}} = (e_{g+1} - h_{g+1} x_{g+1g+2}) \bmod k_{g+1}$. На основі отриманих результатів НТ 3 слідує, що в цій сукупності обов'язково знайдеться таке єдине значення e_{g+1p} , при якому НКС $E^{(p)} = (e_1 \parallel e_2 \parallel \dots \parallel e_{g+1p} \parallel \dots \parallel e_m)$ є неспотвореною. Зазначимо, що черговість перевірки гіпотез є довільною і не впливає на ймовірність корекції помилок. Втім для підвищення швидкості визначення номера спотвореного залишку, першочергово необхідно перевірити ту гіпотезу, для якої значення k_h / x_{h-1h} ($h = g, g+1$) є найменшим.

Наведемо приклад реалізації запропонованого алгоритму (порядку) корекції помилок за допомогою НКС з взаємно не простими основами СЗК.

Розглянемо СЗК, що представлена наступними основами $k_1 = 4, k_2 = 6, k_3 = 12, k_4 = 18$. При цьому $K = 36, x_{12} = 2, x_{23} = 6, x_{34} = 6, x_{41} = 2$. Обсяг НКС наведено в табл. 1.

Потрібно встановити правильність НКС $E = (3 \parallel 5 \parallel 7 \parallel 7)$, та за наявності факту спотворення даної НКС відредагувати неправильний залишок.

1. Необхідно обчислити значення $e_{12} = 0, e_{23} = 2, e_{34} = 0, e_{41} = 0$. Так як $e_{23} \neq 0$, то НКС E є неправильною, і другий чи третій залишок містить помилку.

2. Так як $k_2 / x_{12} > k_3 / x_{34}$, то перша гіпотеза полягає в тому, що помилка припускається у залишку за основою k_3 .

3. Визначимо значення $e_{3h_3} = e_3 - h_3 x_{23}$ для значення $h_3 = 1$. Отримаємо $e_{3h_3} = e_3 - h_3 x_{23} = 7 - 1 \cdot 6 = 1$, при якому отримана $E^{(1)} = (3 \parallel 5 \parallel 1 \parallel 7)$ не являється кодовим словом (табл. 1). Відповідно перша гіпотеза буде невірною і саме в залишку за основою k_2 ста-

лася помилка.

4. виправимо число E . Для цього розрахуємо шукане значення $e_{2h_2} = e_2 - h_2 x_{21}$ за значенням $h_3 = 1, 2$:

$$h_2 = 1, e_{2h_2} = e_2 - h_2 x_{21} = 5 - 1 \cdot 2 = 3,$$

$$h_2 = 3, e_{2h_2} = e_2 - h_2 x_{21} = 5 - 2 \cdot 2 = 2.$$

Таким чином, отримаємо два кодових слова: $E^{(1)} = (3 \parallel 3 \parallel 7 \parallel 7)$ та $E^{(2)} = (3 \parallel 1 \parallel 7 \parallel 7)$. Згідно з табл. 1, значення $E^{(2)}$ є єдиним правильним кодовим словом, тобто $E_{\text{вип}} = E^{(2)} = (3 \parallel 1 \parallel 7 \parallel 7)$.

Таблиця 1 – Відповідність НСК кодовим словам СЗК [4]

E	Кодові слова в СЗК				E	Кодові слова в СЗК			
	k_1	k_2	k_3	k_4		k_1	k_2	k_3	k_4
0	0	0	0	0	15	3	3	3	15
1	1	1	1	1	16	0	4	4	16
2	2	2	2	2	17	1	5	5	17
3	3	3	3	3	18	2	0	6	0
4	0	4	4	4	19	3	1	7	1
5	1	5	5	5	20	0	2	8	2
6	2	0	6	6	21	1	3	9	3
7	3	1	7	7	22	2	4	10	4
8	0	2	8	8	23	3	5	11	5
9	1	3	9	9	24	0	0	0	6
10	2	4	10	10	25	1	1	1	7
11	3	5	11	11	26	2	2	2	8
12	0	0	0	12	27	3	3	3	9
13	1	1	1	13	28	0	4	4	10
14	2	2	2	14					

E_g	Кодові слова в СЗК		
	k_1	k_2	k_3
0000	00	000	0000
0001	01	001	0001
0010	10	010	0010
0011	11	011	0011
0100	00	100	0100
0101	01	101	0101
0110	10	000	0110
0111	11	001	0111
1000	00	010	1000
1001	01	011	1001
1010	10	100	1010
0101	11	101	1011

Отже, запропонований метод корекції помилок у СЗК сприяє розширенню класу коригованих по-

милок, що суттєво розширює коригуючі можливості НКС з взаємно не простими основами СЗК.

Очевидно, що процес виявлення помилок в апаратно-часовому аспекті реалізується винятково просто. Час виявлення помилок для СЗК, заданої будь-якими взаємно не простими основами, завжди дорівнює трьом умовним часовим тактам і не залежить від кількості інформаційних основ.

Розглянемо деякі доведення, які дозволять спростити вищеописане пристрій для виявлення помилок. Спочатку доведемо співвідношення $(e_1 + e_g) = (e_1 + e_g) \text{ mod } x_{1g}$, на основі якого складемо алгоритм корекції помилок. Нехай в НКС $E = (e_1 \parallel e_2 \parallel \dots \parallel e_m)$ спотворено залишок k_i , тобто $\tilde{e}_i = (e_i + \Delta e_i) \text{ mod } k_i$. Запишемо систему рівностей:

$$h_1 = e_g - \tilde{e}_i = e_g + (k_i - \tilde{e}_i) = (e_g - e_i + k_i - \Delta e_i) \text{ mod } k_i,$$

$$h_2 = \tilde{e}_i - e_g = e_i + \Delta e_i - e_g = (e_i - e_g + e_i) \text{ mod } k_i.$$

Складемо рівності та отримаємо $h_1 + h_2 = k_i \text{ (mod } k_i)$ або $h_1 + h_2 = 0 \text{ (mod } x_{gi})$.

Таким чином, показано, що виконується рівняння $(e_1 + e_g) = (e_1 + e_g) \text{ mod } x_{1g}$, тобто в пристрої для виявлення помилок замість $m-1$ суматорів за модулем k_g достатньо мати лише один суматор за модулем k_1 .

Розроблений алгоритм реалізації процесу виявлення помилок визначається наступними співвідношеннями: $e_2 + k_1 - e_1 = (e_2 + e_1) \text{ mod } x_{12}$ і $e_3 + k_1 - e_1 = (e_3 + e_1) \text{ mod } x_{13}$.

Вище розглянуті варіанти пристроїв для визначення помилок у СЗК дозволяють гарантовано виявити факт спотворення НКС E , однак при цьому не визначається номер основи, за якою сталося спотворення залишку.

Діагностика спотворення НКС E ґрунтується на наступній процедурі. Дослідимо процедуру визначення номера залишку, за яким сталося спотворення E .

Розглянемо СЗК, що представлена наступними основами $k_1 = 4, k_2 = 6, k_3 = 12, k_4 = 18$. При цьому $B = K = [4, 6, 12, 18] = 36, x_{12} = 2, x_{23} = 6, x_{34} = 6, x_{41} = 2, E = (0 \parallel 2 \parallel 8 \parallel 2)$.

Розглянемо випадок, що НКС E спотворена за основою k_4 , тобто $e_4 = (e_4 - \Delta e_4) \text{ mod } k_4$, та припустимо, що $\Delta e_4 = 5$. У цьому випадку на виході суматора за модулем k_2 отримаємо значення $\bar{e}_2 = k_2 - e_2 = 4$; по модулю k_3 отримаємо $\bar{e}_3 = k_3 - e_3 = 4$, на виході суматора за модулем $k_4 - e_4 = k_4 - e_4 = 11$. На виході суматора за модулем x_{12} отримаємо число, що відповідає значенню $(e_1 + e_2) = 0 \text{ (mod } x_{12})$, на виході суматора модулю x_{23} отримаємо число $(e_1 + e_3) = 0 \text{ (mod } x_{23})$, на виході суматора по модулю x_{34} отримаємо число

$(e_3 + \bar{e}_4) = 0 \pmod{x_{34}}$, на виході суматора по модулю x_{41} отримуємо число $(e_4 + \bar{e}_1) = 1 \pmod{x_{41}}$. На входах суматорів по модулю x_{34} та x_{41} присутній ненульовий результат операції $(e_k + \bar{e}_i) \pmod{x_i}$, тому відкритий четвертий елемент I, тобто на четвертій вихідній шині присутній сигнал. Звідси випливає, що помилка сталася у четвертому залишку e_4 (табл. 2).

На основі доведеного НТ 3 необхідною умовою виявлення помилки у залишку за модулем k_g СЗК є умова 1. Ця умова є і достатньою, якщо помилка $\Delta e_g = \tilde{e}_g - e_g$ не кратна одночасно дільникам $x_{g-1 g}$ та x_{gi+1} , тобто наступним двом дільникам $x_{\Delta e_g}^{(g-1)} = (x_{g-1 g}, \Delta e_g) = 1$ та $x_{\Delta e_g}^{(g+1)} = (x_{gi+1}, \Delta e_g) = 1$.

Таблиця 2 – Відповідність НСК кодовим словам СЗК [4]

E	Кодові слова в СЗК				E	Кодові слова в СЗК			
	k_1	k_2	k_3	k_4		k_1	k_2	k_3	k_4
0	0	0	0	0	18	2	0	6	0
1	1	1	1	1	19	3	1	7	1
2	2	2	2	2	20	0	2	8	2
3	3	3	3	3	21	1	3	9	3
4	0	4	4	4	22	2	4	10	4
5	1	5	5	5	23	3	5	11	5
6	2	0	6	6	24	0	0	0	6
7	3	1	7	7	25	1	1	1	7
8	0	2	8	8	26	2	2	2	8
9	1	3	9	9	27	3	3	3	9
10	2	4	10	10	28	0	4	4	10
11	3	5	11	11	29	1	5	5	11
12	0	0	0	12	30	2	0	6	12
13	1	1	1	13	31	3	1	7	13
14	2	2	2	14	32	0	2	8	14
15	3	3	3	15	33	1	3	9	15
16	0	4	4	16	34	2	4	10	16
17	1	5	5	17	35	3	5	11	17

Згідно з результатами НТ 3 побудуємо алгоритм корекції помилок за довільним основою k_g :

1. Визначимо всі можливі значення типу $(e_g - e_{g+1}) = e_{g g+1} \pmod{x_{g g+1}}$,

$$\begin{cases} e_1 - e_2 = e_{12} \pmod{x_{12}}, \\ e_2 - e_3 = e_{23} \pmod{x_{23}}, \\ \dots \\ e_{m-1} - e_m = e_{m-1 m} \pmod{x_{m-1 m}}, \\ e_m - e_1 = e_{m1} \pmod{x_{m1}} \end{cases} \quad (3)$$

2. Якщо всі значення (3) дорівнюють нулю, то або помилки немає, або вона кратна кожному з дільників x_{g-1} , $x_{g g+1}$, (припускається однократна помилка).

3. Якщо $e_{g-1 g} \neq 0$, $e_{g g+1} \neq 0$, а всі інші значення

$e_{gi} = 0$, то помилка сталася за модулем k_g , тобто $\tilde{e}_g = e_g + \Delta e_g$ ($1 \leq \Delta e_g \leq k_g - 1$).

Згідно з доведеною НТ 3 необхідною умовою для виправлення помилки у залишку є умова записана в загальному вигляді:

$$(x_{gh} - 1)(x_{gi} - 1) \geq \gamma(\Delta e_g), \quad (4)$$

де $\gamma(\Delta e_g) = k_g - 1 - (L_{x_{gh}} + L_{x_{gi}} - L_{[x_{gh}, x_{gi}]})$. При цьому маємо наступні позначення $L_{x_{gh}}$ – число можливих дільників помилок Δe_g за основою k_g (число можливих дільників числа $k_g - 1$), кратних значенню x_{gh} ; $L_{x_{gi}}$ – число можливих дільників помилок Δe_g за основою k_g , кратних значенню x_{gi} ; $L_{[x_{gh}, x_{gi}]}$ – число можливих дільників помилок Δe_g за основою k_g , кратних значенню найменшого спільного кратного чисел x_{gh} та x_{gi} .

Зазначимо, що умова (4) є достатньою, якщо різним можливим значенням помилок $\gamma(\Delta e_g)$ за основою k_g ($g = \overline{1, m}$) відповідають різні пари величин e_{gh} та e_{gi} .

Розглянемо приклад конкретного виконання операції корекції помилок у СЗК, заданій основами $k_1 = 4$, $k_2 = 6$, $k_3 = 12$. У цьому випадку таблиця кодових слів $B = [4, 6, 12] = 12$ подається у вигляді табл. 2. Зазначимо, що $x_{12} = (4, 6) = 2$, $x_{23} = (6, 12) = 6$, $x_{31} = (4, 12) = 4$; $\gamma(\Delta e_1) = 2$ (табл. 3), $\gamma(\Delta e_2) = 3$ (табл. 3), $\gamma(\Delta e_3) = 8$ (табл. 4), де:

$$\gamma(\Delta e_1) = k_1 - 1 - (L_{x_{12}} + L_{x_{31}} - L_{[x_{12}, x_{31}]}) ,$$

$$\gamma(\Delta e_2) = k_2 - 1 - (L_{x_{12}} + L_{x_{23}} - L_{[x_{12}, x_{23}]}) ,$$

$$\gamma(\Delta e_3) = k_3 - 1 - (L_{x_{23}} + L_{x_{31}} - L_{[x_{23}, x_{31}]}) .$$

Таблиця 3 – Таблиця рішень

e_{31}	$e_{12} = 1$	e_{23}	$e_{12} = 1$
1	$\bar{\Delta e}_1 = 1$	1	$\bar{\Delta e}_2 = 5$
2	–	3	$\bar{\Delta e}_2 = 3$
3	$\bar{\Delta e}_1 = 3$	5	$\bar{\Delta e}_2 = 1$

Таблиця 4 – Таблиця рішень

e_{31}	e_{23}				
	1	2	3	4	5
1	$\bar{\Delta e}_3 = 7$	–	$\bar{\Delta e}_3 = 3$	–	$\bar{\Delta e}_3 = 11$
2	–	$\bar{\Delta e}_3 = 2$	–	$\bar{\Delta e}_3 = 10$	–
3	$\bar{\Delta e}_3 = 1$	–	$\bar{\Delta e}_3 = 9$	–	$\bar{\Delta e}_3 = 5$

Необхідно визначити правильність НКС $E = (11 \parallel 100 \parallel 0111)$. У перший і другий вхідні регістри заноситься вихідне число E . Перший суматор першої групи визначає значення $\bar{e}_1 = k_1 - e_1 = 01$, другий суматор визначає значення $\bar{e}_2 = k_2 - e_2 = 010$, а третій суматор визначає значення $\bar{e}_3 = k_3 - e_3 = 0101$. Перший суматор по модулю x_{g_i} визначає значення $e_{12} = (e_1 + \bar{e}_2) \bmod_{12}$, другий суматор $e_{23} = (e_2 + \bar{e}_3) \bmod_{23}$, третій суматор $e_{31} = (e_3 + \bar{e}_1) \bmod_{13}$. Таким чином, з виходів відповідних дешифраторів тільки на другий комутатор надходять значення $e_{12} = 1$, $e_{13} = 3$, відповідно до яких (див. табл. 6) він визначає значення інвертованої за модулем k_2 помилки, тобто $\Delta e_2 = 3$, які через другий дешифратор у двійковому коді надходить на перший вхід другого суматора, на другий вхід якого надходить значення $e_2 = e_2 + \Delta e_2 = 100$. Суматор другої групи визначає значення результату операції $(\Delta e_2 + e_2) \bmod_{k_2} = (k_2 - \Delta e_2 + e_2 + \Delta e_2) \bmod_{k_2} = 001$. На вихід пристрою надходить виправлена НКС $E = (11 \parallel 100 \parallel 0111)$ (табл. 2).

Висновки

У статті уточнено деякі аспекти теорії коригувальних НКС, представлених набором взаємно не простих основ СЗК.

Розроблено алгоритми контролю та корекції помилок в СЗК з взаємно простими основами. Використання цих алгоритмів дозволяє відносно просто реалізувати процедуру виявлення та виправлення одноразових помилок.

Запропоновані в статті процедури контролю, виявлення і корекції одноразових помилок дозволяють локалізувати помилкову основу і виправити помилку в одному залишку всього за п'ять умовних тактів для будь-якої кількості основ СЗК. Основні переваги НКС з взаємно не простими основами СЗК полягають у технічній та часовій простоті процедури контролю та виявлення помилок.

Варто зазначити, що за простотою конструкції схем декодувальних пристроїв розглянутих НКС з взаємно не простими основами СЗК не мають аналогів у позиційних системах числення.

Це досягається за рахунок обмеження класу можливих коректованих помилок шляхом введення додаткової апаратурної надмірності представлення кодових слів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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. (Ebook).
2. Onyshchenko S., Yanko A., Hlushko A., Sabelnikova P. Assessment of information protection level against unauthorized access. ScienceRise, 2, Tallinn, Estonia, 2023, pp. 36–44. <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2023.003211>
3. Mohan P. V. A. Residue Number Systems: Theory and Applications. Birkhäuser Basel, Switzerland, 2016, 351 p.
4. Krasnobayev V., Kuznetsov A., Yanko A., Kuznetsova K. Correction Codes in the System of Residual Classes. Proceedings of 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 488–492. <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061253>.
5. Янко А.С., Сабельнікова П.С. Метод виявлення та виправлення помилок на основі часових числових перерізів. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління, Баку-Харків-Жиліна, 2024, Т. 2, С. 14. <https://doi.org/10.32620/ICT.24.t2>.

Received (Надійшла) 24.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.11.2024

Improving the efficiency of the data correction process in the system of residual classes

Alina Yanko, Alina Hlushko, Oleg Kruk, Andrii Prokudin

Abstract. The article examines the influence of the corrective abilities of non-positional code structures, which are represented by mutually non-prime bases of the system of residual classes (SRC). Currently, non-positional code structures, which are represented by a set of mutually non-prime bases of SRC, have been researched rather superficially and are described qualitatively rather than quantitatively. The fact is that until now, almost no one has been engaged in a deep research of the corrective properties of non-positional code structures of SRC, the bases of which are mutually non-prime numbers. Such a system also has significant corrective capabilities, which makes it necessary to assess the possibility and expediency of using non-positional code structures presented in the form of mutually non-prime bases for increasing the reliability of computer system calculations. For the purpose of further research and development of these non-positional code structures, we will consider a number of scientific statements, the use of the results of which will allow us to more fully investigate the corrective properties of non-positional code structures with mutually non-prime bases. Algorithms for control and correction of data in SRC with mutually pairwise non-prime bases have been developed. The use of these algorithms makes it relatively simple to implement the procedure for detecting and correcting single errors. The process of detecting errors in the considered non-positional code structures in the hardware-time aspect is implemented extremely simply. The error detection time for the SRC given by any mutually non-prime bases is always equal to three conventional time cycles and does not depend on the number of information bases. Note that due to the simplicity of the design of decoding device schemes, the considered non-positional code structures have no analogues in positional counting systems. This is achieved by limiting the class of possible corrected errors by introducing additional hardware redundancy in the representation of non-positional code structures in the SRC.

Keywords: mutually non-prime bases; error correction; computer systems; data correction; corrective properties; system of residual classes.

Н. Б. Бурдейна, Я. А. Підлісний

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

Анотація. Досліджено електромагнітну обстановку, яка формується системами життєзабезпечення промислових та житлових будівель і споруд. Актуальність дослідження обумовлена тим фактом, що насиченість побутового середовища електричним та електронним обладнанням знижує ефективність відновлення організму людини після впливу електромагнітних полів у процесі трудової діяльності. Розглядалися умови, за яких як у виробничих, так і побутових умовах усі пристрої, що періодично впливають на рівні електромагнітних полів, були вимкнені. Проведено натурні вимірювання значень електричної і магнітної складових електромагнітного поля промислової частоти та електромагнітних полів частот бездротового зв'язку фонових значень у офісних та житлових приміщеннях. Вимірювання здійснювалися у офісних та житлових приміщеннях у денний та вечірній час. Встановлено, що у денний час електричні поля промислової частоти у офісних приміщеннях склали 18–25 В/м, у житлових – 7–9 В/м; магнітні поля – 0,2–1,8 мкТл, 0,12–0,14 мкТл; щільності потоків енергії електромагнітних полів ультрависоких частот – 0,16–1,20 мкВт/см² та 0,14–1,30 мкВт/см² відповідно. У вечірній час амплітудні значення склали відповідно 13–24 В/м; 14–28 В/м; 0,14–1,30 мкТл; 0,18–0,22 мкТл; 0,12–0,19 мкВт/см²; 0,18–1,35 мкВт/см². Вибірка приміщень випадкова. Вплив зовнішніх джерел на електромагнітну обстановку у приміщеннях не враховувався. Вимірювання полів наднизької частоти здійснювалося без врахування впливу гармонік та інтергармонік промислової частоти, що відповідає вимогам чинних санітарних норм. Показано, що електричні та магнітні поля гармонік промислової частоти, кратні трьом автоматично генеруються в умовах наявності обладнання з нелінійними вольт-амперними характеристиками й наведено розрахунок значень відповідних електричних струмів. Показано, що крім цього, за випадкових несиметричностей електронавантажень на окремі фази трифазної силової мережі можлива додаткова генерація напруг, струмів гармонік промислової частоти та електричних і магнітних полів, які ними генеруються. Враховуючи практичну неможливість уникнення генерації обладнанням з нелінійними вольт-амперними характеристиками генерації полів гармонік промислової частоти та повної симетричності навантаження, обґрунтована доцільність розроблення технічно та економічно прийнятнього обладнання компенсації реактивної потужності у мережах напруги 0,4 кВ з функціями придушення гармонік промислової частоти.

Ключові слова: електромагнітна безпека, система життєзабезпечення, гармоніки промислової частоти.

Вступ

Не дивлячись на впровадження енергозощаджувальних технологій, споживання електроенергії у будівлях і спорудах залишається на високому рівні. Більшість енерговитрат обумовлена роботою виробничого обладнання у промислових будівлях та побутового – у житлових. Але значні витрати електроенергії обумовлені функціонуванням систем життєзабезпечення будівель і споруд. Це ліфтове господарство, вбудовані трансформатори, електроциоти, електропривод насосів водопостачання тощо. Особливо це стосується висотних будівель, у яких на нормативному рівні передбачена наявність вбудованих трансформаторів сухого типу систем примусової вентиляції і комплексу автоматизації інженерних систем будинків. Ці джерела генерують електричні та магнітні поля, що обумовлено фундаментальними фізичними законами. Ситуація ускладнюється тим, що значна частина електричного та електронного обладнання має нелінійні вольт-амперні характеристики. Це автоматично призводить до генерації обладнанням гармонік та інтергармонік електричного струму промислової частоти, які генерують відповідні магнітні поля. В той же час, чинні державні будівельні норми з проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення не

передбачають обов'язкової наявності систем компенсації реактивної потужності з урахуванням наявності гармонік та інтергармонік електроструму промислової частоти.

У результаті, системи забезпечення функціонування будівель і споруд різного призначення генерують електромагнітні поля гігієнічно значущих рівнів. Кількісні значення електричних та магнітних полів такого походження досліджені недостатньо з огляду на постійне оновлення обладнання. Наведене обумовлює актуальність даного дослідження.

Огляд досліджень і розробок. Найбільша кількість досліджень та розробок з тематики, що розглядається стосується якості електроенергії у будівлях в цілому, без з'ясування джерел спотворень.

У роботах [1, 2] визначено кількісні значення електроструму витoku у трифазних силових електромережах та розроблено засоби придушення гармонік та інтергармонік у електромережах. З набуттям чинності в Україні загальноєвропейських стандартів електромагнітної сумісності, наприклад [3, 4] постає задача нормалізації усіх показників якості електроенергії. Головною проблемою з точки зору безпеки людей як у виробничому, так і у побутовому середовищі є те, що гармоніки та інтергармоніки змінного струму промислової частоти генерують відповідні магнітні поля. Ці електроструми протікають тільки нульовим

робочим провідником трифазної електромережі, тому генеровані ними магнітні поля не компенсуються полями, генерованими струмами протилежної спрямованості. Дослідженню джерел гармонії електричних струмів промислової частоти освячена робота [5, 6]. Але на сьогодні вони є застарілими через часткову зміну електричного та електронного обладнання виробничого та побутового призначення. У роботі [7] показано, що більшість систем електроживлення будівель, зокрема системи організації заземлення негативно впливають на електромагнітну обстановку виробничих середовищ. Але джерелами нормативних полів, крім системи електроживлення в цілому, можуть бути конкретні одиниці або групи однотипного обладнання. Щодо об'єктів енергетики, це досліджено у роботі [8]. Щодо підприємств цивільної авіації, то усі можливі джерела електромагнітних полів досліджено у роботі [9]. Але у більшості будівель і споруд є стандартне обладнання життєзабезпечення з великою кількістю електричних та електронних компонентів, які генерують електромагнітні поля непередбачуваних напруженостей та закономірностей поширення. Дослідження електромагнітних полів важливе з точки зору відокремлення генерованих ними полів від полів технологічного обладнання. Це є важливим з точки зору розроблення та впровадження організаційно-технічних заходів електромагнітної безпеки.

Мета роботи – дослідити амплітудно-частотні характеристики електромагнітних полів електричного та електронного обладнання систем життєзабезпечення будівель і споруд та визначити головні напрями їх нормалізації.

Викладення основного матеріалу

Важливість розгляду електромагнітних полів систем життєзабезпечення будівель різного призначення обумовлена тим, що ці системи функціонують постійно, тому створюють електромагнітний фон. Таким чином, відбувається хронічний вплив електромагнітних полів на людей.

Традиційним підходом до визначення впливу будь-яких небезпечних та шкідливих технологічних факторів на людей є дозовий підхід. Щодо електромагнітних полів, то зазвичай оцінюється добуток напруженостей електричних і магнітних полів, або щільності потоку енергії на час впливу. Тому вважалося, що у виробничих умовах працюючі піддаються певному несприятливому впливу з боку електричного або електронного обладнання і такий вплив розраховується для восьмигодинної експозиції.

У позаробочий час вважалося, що відбувається відновлення організму.

У сучасних умовах ситуація дещо змінилася. В останнє десятиріччя відбулося насичення побутового середовища електричним та електронним обладнанням різного призначення, яке має широкий частотний діапазон електромагнітних полів і впливає на людей постійно. Наприклад, це системи бездротового зв'язку різного призначення. Щільності потоків енергії від роутерів невеликі, але у будь-якій будівлі таких пристроїв достатньо багато. В останній час відбувається поступовий перехід на індивідуальні системи підігріву води. Бойлери підключені до системи електроживлення постійно, тому у електромережі у нічний час циркулює електричний струм, який генерує магнітні поля. При цьому електронні системи терморегуляції мають нелінійні вольт-амперні характеристики, що обумовлює складний гармонічний склад цих полів. У таких умовах кумулятивний ефект впливу електромагнітних полів на людей непередбачуваний.

Аналогічно можна розглядати і виробниче середовище, у якому постійно функціонують багато джерел електромагнітних полів.

Визначенню фонових значень електромагнітних полів широкого частотного діапазону як у виробничих, так і у побутових умовах майже не приділялося уваги. Тому доцільно оцінити рівні електромагнітних полів наднизької частоти (промислової) та ультрависоких частот у найбільш типових будівлях. Найпоширенішими виробничими будівлями є будівлі, які умовно можна назвати офісними. Це адміністративні будівлі і приміщення, заклади освіти, більшість медичних закладів тощо. У приміщеннях цих споруд функціонує стандартне обладнання – трифазна силова електромережа, ліфти, циркуляційні насоси систем опалення, комп'ютерна техніка тощо. Основна частина житлових будівель також має однотипне обладнання, яке потенційно може генерувати електромагнітні поля гігієнічно значущих рівнів.

Було проведено вимірювання кількісних значень електричних і магнітних полів промислової частоти та електромагнітних полів ультрависоких частот у виробничих та житлових будівлях типових конструкцій у денний та вечірній час. Вимірювання здійснювались каліброваними приладами – вимірювачем електричних та магнітних полів промислової частоти ПЗ-50 та вимірювачем електричних та магнітних полів ПЗ-31 (у діапазоні частот бездротового зв'язку – 1,8–5,0 ГГц).

Результати вимірювань наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Значення електричної та магнітної складових електромагнітних полів промислової частоти та електромагнітних полів ультрависоких частот у виробничих та житлових будівлях

Час вимірювань	Офісні будівлі			Житлові будівлі		
	Е, В/м	В, мкТл	W, мкВт/см ²	Е, В/м	В, мкТл	W, мкВт/см ²
денний	18–25	0,2–1,8	0,16–1,20	7–9	0,12–0,14	0,14–1,30
вечірній	13–24	0,14–1,30	0,12–1,19	14–28	0,18–0,22	0,18–1,35

Вибірка приміщень була випадкова, але наведені дані у табл. 1 достатньо типові. Значні відмінності у даних обумовлені кількома причинами. Миттєві навантаження на силову електромережу дуже відрізняються, навіть у межах однієї будівлі (навантаження на різні фази можуть бути різними у залежності від кількості ввімкнених технічних засобів). Неможливо визначити зовнішній вплив на результати вимірювань. Це навантаження на зовнішні лінії електропередачі, вплив базових станцій мобільного зв'язку тощо.

Встановлено, що у межах будівлі значні відмінності обумовлені розташуванням роутерів у помешканнях та виробничих приміщеннях. Як правило, у помешканнях, навіть у денний час найвищі рівні полів промислової частоти спостерігаються на кухнях, що обумовлене роботою холодильників. При цьому усі вимірювання виконувалися у помешканнях з сучасною побутовою технікою. Навіть наведені дані свідчать про наявність проблеми електромагнітної безпеки. Слід враховувати, що вимірювання виконувалися в умовах повного відключення виробничого та побутового обладнання, яке використовується періодично.

Чинними в Україні санітарними нормами з електромагнітної безпеки [10, 11] у області електромагнітних полів наднизької частоти передбачений контроль електричної та магнітної складових електромагнітного поля промислової частоти. Контроль полів частот гармонік та інтергармонік промислової частоти здійснюють тільки енергетики з точки зору забезпечення синусоїдальності напруги з метою запобігання втрат енергії. Прилади для гігієнічних досліджень цих частот навіть не атестовано в Україні. В той же час відомо, що усі електроспоживачі з нелінійними вольт-амперними характеристиками автоматично генерують напругу і електрострум частот гармонік промислової частоти. Відповідно з'являються й магнітні поля цих частот. Це погіршує електромагнітну обстановку через те, що поля цих частот додаються до поля основної частоти. В той же час сучасні системи придушення гармонії та інтергармонік [2] застосовуються у силових мережах з великими споживаннями електроенергії з метою зниження енерговтрат. Для мереж напругами 0,4 кВ застосовуються найпростіші системи компенсації реактивної потужності із застосуванням батарей конденсаторів. Крім обмеженості їх функціональних можливостей, стан таких батарей у багатьох будівлях незадовільний.

Електричний струм споживача з нелінійними вольт-амперними характеристиками викликає спотворення синусоїдальної напруги (струму) на вході нелінійного навантаження. Вона відома фахівцям як «пласка» синусоїда.

Такий ефект є наслідком падіння напруги на внутрішньому електроопорі мережі. Викривлення напруги U_n на вході навантаження визначається як:

$$U_n(f) = U_M(f) - I(f)Z_M,$$

де $U_M(f)$ – синусоїдальна напруга силової електромережі; $I(f)$ – імпульсний електричний струм навантаження; Z_M – повний опір електромережі з боку навантаження.

Несинусоїдальний характер електричного струму є наслідком падіння напруги на опорі Z . Це обумовлено наявністю на вході нелінійного споживача спотвореної синусоїди напруги. Аналогічне явище має місце на входах усіх споживачів, які підключені паралельно нелінійному навантаженню. у трифазній силовій електромережі генеруються вищі гармоніки напруги промислової частоти, кратні трьом. Так гармоніки мають однакові фази та амплітуди. Це викликає появу у нульовому робочому провіднику трифазної електромережі електричного струму, який дорівнює потроєній сумі електрострумів вищих гармонік, кратних трьом. Навіть за симетричного навантаження несинусоїдальний електричний струм у нульовому робочому провіднику складає:

$$I = 3\sqrt{I_3 + I_9 + \dots I_n}$$

де I_3, I_9, I_n – діючі значення електроструму відповідних гармонік.

Магнітне поле таких струмів не компенсується полем зустрічної спрямованості і погіршує електромагнітну обстановку у будівлі. Не дивлячись на жорсткі вимоги до симетричності електронавантаження окремих фаз у трифазній силовій мережі, симетричність навантаження може порушуватися випадковим чином через вмикання та вимикання достатньо потужних навантажень за наявності у будівлі великої кількості споживачів. Це притаманне як виробничим, так і житловим будівлям. У цьому випадку у силовій електромережі також автоматично з'являються принаймні треті гармоніки електроструму промислової частоти суттєвих амплітуд.

За одночасної появи кількох чинників зміни гармонічного складу електроживлення, навіть за їх незначними окремими значеннями, сумарний ефект може бути гігієнічно значущим фактором впливу на людей.

Практично усі сучасні електричні та електронні пристрої промислового та побутового призначення є електроспоживачами з нелінійними вольт-амперними характеристиками. Це обумовлено вагомими технічними та економічними перевагами. Тому, для зниження впливу небажаних явищ щодо несприятливого впливу електромагнітних полів на людей у виробничих та побутових умовах доцільно розробити прийнятну за функціоналом конструкцію одночасного придушення гармонік та інтергармонік напруги промислової частоти і компенсації реактивної потужності у низьковольтних мережах електроживлення та виробничих і житлових будівель та споруд.

Висновки

1. Натурні вимірювання електричних та магнітних складових електромагнітних полів промислової частоти, а також електромагнітних полів частот бездротового зв'язку у виробничих та житлових приміщеннях свідчить, що навіть за відсутності навантаження з боку технологічного та побутового обладнання рівні електромагнітних полів суттєві.

2. У процесі вимірювань не враховувалися значення електричних та магнітних полів частот гар-

монік та інтергармонік промислової частоти через відсутність санітарних вимог до їх амплітуд значень та відповідного метрологічного забезпечення. Показано, що поля гармонік промислової частоти обов'язково генеруються сучасним обладнанням з нелінійними вольт-амперними характеристиками.

Це обумовлює необхідність врахування полив гармонік для зниження електромагнітного навантаження на людей.

3. Встановлено, що навіть за штатного функціонування силової трифазної електромережі генеруються електромагнітні поля гармонік промислової частоти через випадкові зміни навантаження на окремі фази трифазної електромережі. Тому для придушення гармонік доцільно розробити технічно і економічно прийнятне обладнання, яке одночасно виконує функцію компенсації реактивної потужності у мережах напругами 0,4 кВ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Здановський В. Г., Дармофал Е. А., Перельот Т. М. Електроструми витоку як джерела магнітних полів ненормативних рівнів та методи їх зниження. Системи обробки інформації. 2016. Вип. 5 (142). С. 178–181.
2. Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К., Бараненко Е.В. Методи компенсації реактивної потужності в сетях с нелінійними загрузками. Вісник приазовського державного технічного університету. 2013. Вип. 26. С. 204–210.
3. EN 61439-1:2011 Low-voltage switchgear and controlgear assemblies. General rules. European standards. веб-сайт. URL: <https://www.en-standard.eu/une-en-61439-1-2012-low-voltage-switchgear-and-controlgear-assemblies-part-1-general-rules>
4. EN 61439-2:2012. Low-voltage switchgear and controlgear assemblies - Part 2: Power switchgear and controlgear assemblies. European standards. URL: <https://www.en-standard.eu/une-en-61439-2-2012-low-voltage-switchgear-and-controlgear-assemblies-part-2-power-switchgear-and-controlgear-assemblies>
5. Глива В.А. та ін. Джерела гармонік магнітного поля у будівлях і спорудах та мінімізація їх рівнів. Проблеми охорони праці в Україні. 2015. Вип. 29. С. 48–58.
6. Перельот Т.М. Гармоніки електричних струмів промислової частоти та їх вплив на електромагнітну обстановку у приміщеннях. Гігієна населених місць. 2014. Вип. 64. С. 192–197.
7. Бурдейна Н.Б. Актуальні напрями удосконалення державних будівельних норм проектування нових і реконструкції існуючих закладів освіти. Містобудування та територіальне планування. Київ. 2023. Вип. 82. С. 43-52. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.82.43-52>.
8. Карпалюк І. Т. Методи та засоби оцінки впливу коронного розряду на якість електропостачання: дис. д-ра техн. наук спец. 05.09.03: Харків, 2020. – 333 с.
9. Козловський В.В., Ходаковський О.В., Тихенко О.М., Куцак А.С. Дослідження електромагнітної обстановки на аеродромах цивільної авіації та формування заходів з її нормалізації. Наукоємні технології. 2019. Т. 43, № 3. С. 289–294.
10. ДСН 239-96. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань [Чинний від 2017-12-22]; затв. наказом М-ва охорони здоров'я України від 01.08.1996 р. № 239. Київ, 2017. 28 с. (Державні санітарні норми України).
11. ДСНіП 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів [Чинний від 2003-03-13]; затв. наказом М-ва охорони здоров'я України від 18.12.2002 р. № 476. Київ, 2003. 16 с. (Державні санітарні норми України).

Received (Надійшла) 24.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.11.2024

Studying the levels of electromagnetic fields of life support systems of buildings and structures

N. Burdeina, Ya Pidlisnyi

Abstract. The electromagnetic environment formed by the life support systems of industrial and residential buildings and structures is investigated. The relevance of the study is due to the fact that the saturation of the living environment with electrical and electronic equipment reduces the efficiency of recovery of the human body after exposure to electromagnetic fields in the course of labor activity. The conditions under which all devices that periodically affect the levels of electromagnetic fields were turned off in both industrial and domestic environments were considered. Field measurements of the electric and magnetic components of the electromagnetic field of industrial frequency and the electromagnetic fields of wireless communication frequencies of background values in office and residential premises were carried out. The measurements were carried out in office and residential premises in the daytime and in the evening. It was found that in the daytime, electric fields of industrial frequency in office premises were 18-25 V/m, in residential premises - 7-9 V/m; magnetic fields - 0.2-1.8 μT , 0.12-0.14 μT ; energy flux densities of electromagnetic fields of ultrahigh frequencies - 0.16-1.20 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ and 0.14-1.30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, respectively. In the evening, the amplitude values were respectively 13-24 V/m; 14-28 V/m; 0.14-1.30 μT ; 0.18-0.22 μT ; 0.12-0.19 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$; 0.18-1.35 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. The sample of premises is random. The influence of external sources on the electromagnetic situation in the premises was not taken into account. Measurements of ultra-low frequency fields were performed without taking into account the influence of harmonics and interharmonics of industrial frequency, which meets the requirements of current sanitary standards. It is shown that electric and magnetic fields of harmonics of industrial frequency in multiples of three are automatically generated in the presence of equipment with nonlinear volt-ampere characteristics, and the calculation of the values of the corresponding electric currents is given. It is shown that, in addition, under random asymmetries of electrical loads on individual phases of a three-phase power network, additional generation of voltages, harmonic currents of industrial frequency and the electric and magnetic fields generated by them is possible. Taking into account the practical impossibility of avoiding the generation of industrial frequency harmonic fields by equipment with nonlinear volt-ampere characteristics and complete load symmetry, the expediency of developing technically and economically acceptable reactive power compensation equipment in 0.4 kV networks with industrial frequency harmonic suppression functions is substantiated.

Keywords: electromagnetic safety, life support system, harmonics of industrial frequency.

В. А. Глива, Д. Б. Осадчий

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ НА ОБ'ЄКТАХ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАЦІЇ ТА РОЗРОБЛЕННЯ ЗАСОБІВ ЇХ НОРМАЛІЗАЦІЇ

Анотація. Досліджено рівні електромагнітних полів на найбільш критичних ділянках підприємства теплової генерації електроенергії. Встановлено, що напруженості електричної та магнітної складових електромагнітного поля промислової частоти на робочих місцях персоналу головного щита керування не перевищують граничні рівні. А електромагнітні поля у контрольованих смугах частот для експлуатації комп'ютерної техніки значно перевищують граничні значення. Підвищені концентрації аероіонів обумовлені розрядами явищами у технологічному обладнанні. Отримано спектр електромагнітних полів радіочастот, який свідчить про складність електромагнітної обстановки. Виміряні напруженості магнітних полів навколо турбогенератора потужністю 320 МВт. До відстаней до 5 м від нього напруженості магнітного поля перевищують гранично допустимі рівні. Визначено, що поблизу генератора існує зона мінімального поля, що доцільно використати для визначення зон безпечного пересування персоналу. Несиметричність поля чотириполюсної електричної машини обумовлена фундаментальними фізичними законами. Проведено вимірювання напруженості магнітного поля поблизу шинопровода. За навантаження 280 МВт і напруги 20 кВ напруженості магнітного поля на відстані 2 м від крайнього струмопровода склали – 1,6–1,7 кА/м, що перевищує граничний рівень (1,4 кА/м). Для зниження впливу електромагнітних полів на персонал рекомендовано застосовувати екранування. Для покриття поверхонь великих площ доцільно застосовувати електротехнічну сталь класу 121, для екранування невеликих об'єктів (джерела безперебійного живлення) доцільно застосовувати стрічковий феромагнітний аморфний сплав.

Ключові слова: електромагнітна безпека, електрогенерація, напруженість поля.

Вступ

Підприємства генерації електричної енергії є об'єктами критичної інфраструктури від безперебійної роботи яких залежить безперебійне функціонування усіх ланок промисловості країни та забезпечення належних умов проживання населення. Крім суто технічних аспектів їх роботи існує проблема забезпечення належних умов праці персоналу цих об'єктів, від якого певним чином залежить безперебійність генерації електроенергії. На сьогодні з усіх підприємств генерації найбільша увага приділяється безпеці атомних електростанцій. Тому для них розроблені окремі нормативи щодо заходів безпеки, у тому числі й такі, що регламентують умови праці персоналу. На цю категорію працюючих навіть не розповсюджуються санітарні норми роботи з комп'ютерною технікою. В той же час найбільша кількість електростанцій в усьому світі це теплові електростанції, які навіть у країнах з великими обсягами ядерної генерації є маневровими потужностями, які компенсують нестачу енергії за пікових навантажень. На такі об'єкти поширюються вимоги усіх чинних санітарних норм.

В той же час умовам праці, принаймні щодо електромагнітної безпеки працюючих, на таких підприємствах приділяється недостатньо уваги. Аналіз доступних джерел свідчить, що дослідження рівнів електромагнітних полів на підприємствах теплоенергетики певним чином застаріли. Водночас значна частина теплових електростанцій в Україні ушкоджена внаслідок терористичних атак і підлягає відновленню. Тому актуальною задачею є дослідження умов праці на таких підприємствах та розроблення комплексу перспективних заходів і засобів нормалізації електромагнітної обстановки як на робочих місцях персоналу, так і зниження впливу на населення.

Аналіз публікацій з електромагнітної безпеки об'єктів енергетики. Проблематиці забезпечення електромагнітної безпеки персоналу енергетичних об'єктів присвячено роботи [1, 2]. Розглядалися умови праці персоналу турбогенерованих залів, щитів керування різного рівня. Але ці дослідження певним чином застаріли й потребують уточнення у сучасних умовах. Електромагнітні поля розглядалися у комплексі з іншими фізичними факторами [3], що має певні переваги, але й обмежує дослідження саме електромагнітного чинника. Тим більше, з того часу в Україні методом підтвердження набула чинності низка міжнародних стандартів з електромагнітної сумісності, наприклад [4, 5], що накладає додаткові обмеження на амплітудно-частотні характеристики електромагнітних полів.

Слід враховувати також вимоги нової редакції міжнародного стандарту з електромагнітної безпеки [6], який регламентує рівні електромагнітних полів як для працюючих, так і для населення, і є невід'ємною складовою Європейської директиви з електромагнітної безпеки [7]. У той же час, навіть лінії електропередачі, які відбирають енергію з об'єктів генерації є джерелами магнітних полів гігієнічно значущих рівнів, які потребують екранування [8, 9].

На сьогодні відсутні дослідження щодо рівнів електромагнітних полів відкритих розподільчих пристроїв, значна кількість яких розташована у межах населених пунктів. Наведе обумовлює актуальність дослідження амплітудно-частотних характеристик електромагнітних полів об'єктів електрогенерації й визначення заходів і засобів їх нормалізації та підтримання на нормативному рівні.

Мета дослідження – визначення амплітудно-частотних характеристик електромагнітних полів на об'єктах електрогенерації на розроблення засобів їх нормалізації.

Викладення основного матеріалу

Джерела електромагнітних полів на підприємствах генерації електричної енергії можна умовно розділити на дві категорії: локалізовані та розосереджені у просторі. Така градація обумовлює різні методологічні підходи до зниження напруженостей цих полів. До локалізованих можна віднести генератори та трансформатори. Розосередженими є лінії електропередачі, шинопроводи та обладнання відкритих розподільчих пристроїв.

Найбільш відповідальною ланкою підприємства генерації електроенергії є щити керування. Це обумовлене тим, що від безпомилкових дій персоналу щитів значною мірою залежить стабільність і безаварійність роботи підприємства. На рівні електромагнітних полів на робочих місцях персоналу щитів впливають багато факторів, а згідно чинним санітарним нормам умови праці повинні відповідати нормам роботи з комп'ютерною технікою.

Схема головного щита керування наведена на рис. 1.

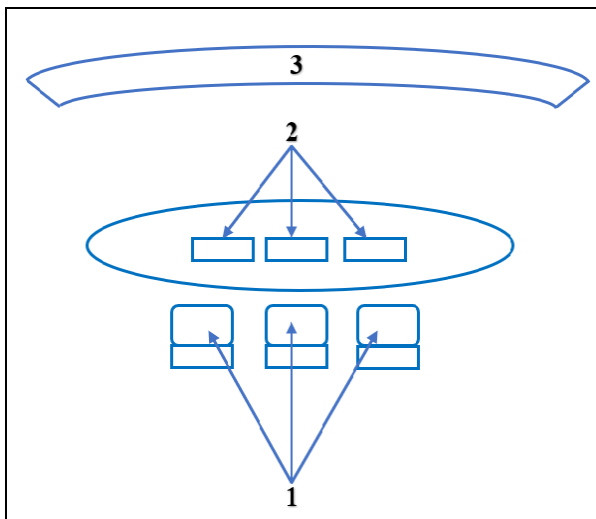


Рис. 1. Схема розташування обладнання головного щита керування теплової електростанції: 1 – робочі місця персоналу, 2 – монітори персональних комп'ютерів, 3 – щит з вимірювальною апаратурою

Слід зазначити, що у загальному випадку ця схема однотипна, але на кожному енергетичному об'єкті відстані робочих місць від шаф з контрольним обладнанням різні. Не стандартизоване комп'ютерне обладнання, ємності й потужності джерел безперебійного живлення. Чи не головною відмінністю є різні режими вентиляції. Тому за будь-яких умов розглядається випадок.

Теж слід зазначити, що згідно з гігієнічною класифікацією умов праці [10] умови праці персоналу щитів керування відповідають класу 3.2. Вимірювання рівнів електромагнітних полів на робочих місцях персоналу здійснювалося для частоти 50 Гц і окремо для частотних смуг 5 Гц–2 кГц та 2 кГц–400 кГц, що відповідає вимогам загальноєвропейського стандарту MPR II [11].

Результати вимірювань наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Значення електромагнітних полів на робочих місцях персоналу головного щита керування

Частота, Гц	Амплітудні значення	
	В, нТл	Е, В/м
50	8700–9100	60–64
5–2000	340–380	24–26
2000–400000	28–34	5,6–6,0

Як видно з табл. 1, значення індукції магнітного та напруженості електричного поля промислової частоти нижчі за гранично допустимі рівні для виробничих умов. Але значення магнітного та електричного поля у контрольованих смугах для засобів обчислювальної техніки значно перевищують гранично допустимі рівні. Додатково було виміряно значення щільностей потоків енергії на частотах бездротового зв'язку 1,8–5,0 ГГц. Вимірювання показали, що це значення перебуває у межах 1,8–2,5 мкВт/см², що відповідає нормативу. Але приміщення головного щита певним чином заэкрановано великою кількістю металевих конструкцій та обладнання. Зазвичай у таких умовах, навіть у залізобетонних будівлях зі щільним розташуванням арматури сигнали значно нижчі. Тому було додатково визначено можливості генерації височастотних випромінювань технологічним обладнанням. Складність полягає у тому, що вимірювання атестованим в Україні каліброваним приладом ПЗ-31 можливі тільки у діапазоні 300 МГц – 30 ГГц, тобто вимірюється інтегральна величина. Вимірювання на частотах бездротового зв'язку – 1,8; 2,4; 2,6; 5,0 ГГц неможливі через те, що ці частоти досить умовні. Реальні робочі частоти відрізняються від них на довільну величину, що натурними вимірюваннями з'ясувати дуже важко.

Було здійснено вимірювання кількісних значень електрозалежного фізичного чинника - концентрації аероіонів у приміщенні головного щита керування.

Значення концентрації:

негативних аероіонів – 650–720 см⁻³,

позитивних – 760–780 см⁻³, ($t = 18 - 19$ °C; $\phi = 45 - 50$ %).

Такі концентрації згідно [10] є нормативними. Але за наявності великої кількості заземлених металевих конструкцій зазвичай спостерігається тенденція до деіонізації повітря. Це свідчить про можливість наявності у приміщенні джерел іонізації повітря. Таким джерелом можуть бути електричні розряди, наприклад коронні.

Будь-які розряди генерують електромагнітні поля високих частот. Вимірювання спектрального складу електричного поля наведено на рис. 2.

Контроль значень електромагнітного поля до частот 300 МГц здійснюється окремо за електричною та магнітною складовими.

Наведені на рис. 2 дані свідчать, що відбувається певна генерація електромагнітних полів радіочастот, яка не притаманна показникам зовнішнього середовища.

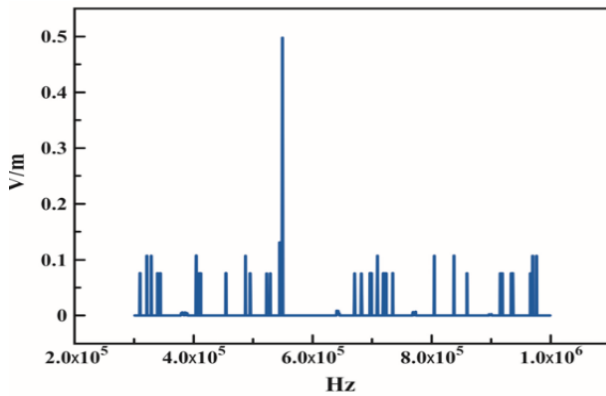


Рис. 2. Спектральний склад електричного поля радіочастот у приміщенні головного щита керування

Амплітудні значення за окремими частотами незначні, але інтегральне значення може бути суттєвим. Слід зазначити, що у процесі вимірювання рівнів полів частот мобільного зв'язку періодично з'являлися короточасні сплески значень поля 4300–5000 мкВт/см². Це набагато вище за чинні граничні значення (100 мкВт/см²), але походження і закономірності появи цих полів не виявлено.

Порівняння отриманих даних з результатами наведеними у роботі [3], свідчить про суттєві відмінності показників на однотипних об'єктах. Дані [3] отримані у зимовий період, тому значення концентрації аероіонів можуть відрізнятися, але це не стосується електромагнітного фактора. Можна дійти висновку, що роботи з моніторингу та нормалізації електромагнітної обстановки на таких об'єктах, як підприємства електрогенерації доцільно виконувати окремо для кожного підприємства.

Було проведено вимірювання значень магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти біля турбогенератора ТГВ 320 потужністю 320 МВт. На момент вимірювань потужність складала 280 МВт. Вимірювання здійснювалися з правого та лівого боку генератора, розташованого горизонтально на майданчику обслуговування. Результати вимірювань наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Напруженості магнітних полів з двох боків турбогенератора

Бік	Відстань, м	H, кА/м
Правий	1	3,2–3,3
	3	2,8–2,9
	5	1,7–1,8
Лівий	1	3,2–3,3
	3	1,2–1,3
	5	1,4–1,5

Отримані результати свідчать, що в усіх точках вимірювання напруженості магнітних полів перевищують гранично допустимий рівень (1,4 кА/м). Виняток – напруженість поля на відстані 3 м з лівого боку генератора. Це явище притаманне магнітному полю електричних машин змінного струму.

За різних закономірностей зниження напруженостей полів двох перших гармонік магнітного поля існує точка нульового значення поля з одного боку електричної машини. Поле усіх багатополосних машин несиметричне, що впливає з дипольно-квадрупольної форми поля (для чотиріпольної машини). Цей факт можна використовувати для визначення зон безпечного пересування персоналу.

За роботи генератора у режимі 280 МВт з робочою напругою 20 кВ шинпроводами тече електричний струм порядку 2,8 кА. Тому були проведені вимірювання напруженості магнітного поля біля шинпроводів. Не дивлячись на те, що шинпроводи мають зовнішню металеву оболонку, на відстані 2 м від крайнього фазного струмопроводу напруженості магнітного поля складала 1,6–1,7 кА/м. Тобто, пересування персоналу містком над повітропроводом повинне бути обмежене.

Слід зазначити, що концентрації аероіонів у турбогенераторній залі перебувають у нормативних межах – негативні – 600–650 см⁻³, позитивні – 670–700 см⁻³. Це можна пояснити іонізацією повітря у колекторному вузлі електричної машини.

Результати вимірювань свідчать, що найбільш критичні перевищення гранично допустимих рівнів електромагнітних полів притаманне робочим місцям персоналу головного щита керування. За рівнями вони не є критичними щодо впливу на здоров'я людей, але формально неприпустимі з точки зору експлуатації комп'ютерної техніки. У такій ситуації можливі проблеми зі стабільністю роботи електронного обладнання.

Для зниження рівнів як електричних так і магнітних полів найбільш ефективним методом є екранування джерел. Чітке визначення джерел полів з боку контрольного обладнання щита керування (3, рис. 1) складне, тому за можливості доцільно заекранувати усе обладнання, крім пристроїв візуалізації даних. Для цього достатньо ефективною є електротехнічна сталь класу 121. В той же час заздалегідь критичне джерело – джерело безперебійного живлення комп'ютерів доцільно екранувати металополімерним гнучким композитом або стрічковим аморфним феромагнітним сплавом.

Ці екрануючі матеріали мають ту перевагу, що залежності їх захисних властивостей від амплітудно-частотних характеристик електромагнітних полів, які потребують екранування, добре досліджені. Слід враховувати, що електротехнічна сталь 121 достатньо ефективна для екранування магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти. Але за підвищення напруженості магнітного поля до значень, більших за 150–200 А/м коефіцієнт екранування знижується.

Недоліком матеріалу є великі коефіцієнти відбиття височастотних електромагнітних хвиль. Аморфний кобальтовий сплав надзвичайно ефективний для усього низькочастотного діапазону. Але за напруженості магнітного поля більше за 50 А/м коефіцієнт екранування різко знижується. У цьому випадку найкращий ефект досягається його комбінацією із залізо-нікелевим сплавом. У будь-якому випадку

застосування екранування відбувається за результатами моніторингу електромагнітної обстановки.

Висновки

1. Встановлено, що на робочих місцях головних щитів керування підприємств генерації електроенергії мають місце перевищення гранично допустимих рівнів електромагнітних полів у контрольованих діапазонах для комп'ютерної техніки. Крім того вимірювальне обладнання щитів генерує складний спектр електромагнітних полів радіочастот.

2. Напруженості магнітних полів біля турбогенераторів у більшості перевищують гранично допустимі значення. Але існують зони з одного боку

генератора де напруженості магнітного поля мінімальні. Цей факт доцільно використовувати для визначення маршрутів безпечного пересування персоналу. Напруженості магнітних полів біля шинопроводів також перевищують гранично допустимі рівні. Це обумовлює доцільність обмеження часу перебування людей у цих зонах.

3. Для зниження рівнів магнітних полів промислової частоти, електричних та магнітних полів контрольованих частотних смуг для комп'ютерної техніки доцільно впроваджувати екранування. Найбільш прийнятними екрануючими матеріалами є електротехнічні сталі класу 121 та аморфні феромагнітні сплави.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Здановський В. Г., Глива В. А., Паньків Х. В. Дослідження рівня магнітних полів енергетичних об'єктів. Проблеми охорони праці в Україні. 2013. Вип. 25. С. 22–29.
2. Паньків Х.В., Глива В.А. Методи визначення та зниження впливу електромагнітних полів енергетичних об'єктів на персонал. Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. 2013. Вип. 758. С. 51–56.
3. Паньків Х.В. Нормалізація фізичних факторів виробничого середовища енергетичних об'єктів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 Київ, 2016. 22 с.
4. IEC 61000-3-12:2011. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current >16 A and ≤ 75 A per phase. International Electrotechnical Commission. URL: https://www.iec.ch/emc/emc_prod/prod_emission.htm
5. EN 61439-2:2012. Low-voltage switchgear and controlgear assemblies - Part 2: Power switchgear and controlgear assemblies. European standards. URL: <https://www.en-standard.eu/une-en-61439-2-2012-low-voltage-switchgear-and-controlgear-assemblies-part-2-power-switchgear-and-controlgear-assemblies>
6. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 KHz to 300 GHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Health Physics. 2020. Vol. 118, № 5. P. 483–524. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210>.
7. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj>
8. 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>.
9. 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>
10. ДСНтаП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», затв. Наказом МОЗ України від 8.04.2014 № 248. [Чинний від 2014-05-30]
11. MPR II. The Swedish government standard for maximum video terminal radiation. URL: <https://www.computerlanguage.com/results.php?definition=TCO>

Received (Надійшла) 24.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.11.2024

Studying the levels of electromagnetic fields at power generation facilities and developing means of their normalization

V. Glyva, D. Osadchiy

Abstract. The levels of electromagnetic fields in the most critical areas of a thermal power generation enterprise are investigated. It is established that the intensity of the electric and magnetic components of the electromagnetic field of industrial frequency at the workplaces of the main control panel personnel does not exceed the limit levels. And the electromagnetic fields in the controlled frequency bands for the operation of computer equipment significantly exceed the limit values. Elevated concentrations of air ions are caused by discharge phenomena in technological equipment. The spectrum of radio frequency electromagnetic fields was obtained, which indicates the complexity of the electromagnetic situation. The magnetic field strengths around a 320 MW turbine generator were measured. For distances up to 5 m from it, the magnetic field strengths exceed the maximum permissible levels. It was determined that there is a zone of minimal field near the generator, which is advisable to use to determine the zones of safe movement of personnel. The asymmetry of the field of a four-pole electric machine is due to fundamental physical laws. The magnetic field strength near the busbar was measured. At a load of 280 MW and a voltage of 20 kV, the magnetic field intensity at a distance of 2 m from the outermost current conductor was 1.6–1.7 kA/m, which exceeds the limit level (1.4 kA/m). To reduce the impact of electromagnetic fields on personnel, it is recommended to use shielding. To cover large surfaces, it is advisable to use electrical steel of class 121, for shielding small objects (uninterruptible power supply) it is advisable to use a tape ferromagnetic amorphous alloy.

Keywords: electromagnetic safety, power generation, field strength.

В. А. Глива¹, К. К. Ткачук², М. С. Кашлев¹

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

²Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНІВ ШУМУ ПРИ РЕКОНСТРУКЦІЇ Й ВІДНОВЛЕННІ БУДІВЕЛЬ І ВИЗНАЧЕННЯ ЗАХОДІВ ЙОГО ЗНИЖЕННЯ

Анотація. Досліджено рівні будівельної техніки, яка використовується для ремонтів і відновлення будівель у межах житлової забудови. Встановлено, що у більшості випадків має місце перевищення гранично допустимих значень для населених місць. Аналіз вимірювань у октавних смугах частот свідчить, що переважає низькочастотний шум. Для ефективного зниження такого шуму доцільно застосовувати резонансні поглиначі. Надано розрахункову формулу для визначення резонансної частоти панелі. Налаштування панелі на частоту звуку найбільшої амплітуди значень перевищує ефективність захисту. Вимірні рівні шуму найбільш поширених електрогенераторів резервного електропостачання. Встановлено, що шум дизельних генераторів не перевищує гранично допустимих рівнів. Шум бензинових електрогенераторів значно перевищує граничні рівні. Запропоновано порядок розроблення захисної конструкції. У якості критичної частоти доцільно обрати частоту звуку з найбільшою амплітудою. Для цього на попередньому етапі проектування доцільно отримати максимально неперервний спектр звуку. Для одночасного екранування звуку та інфразвуку використовується двошарова панель. Кожен шар (панелі) налаштовується на певну частоту – резонансну і критичну. Це робить конструкцію широкосмуговою. Для підвищення ефективності конструкції прошарок між двома панелями слід заповнювати звукопоглинальним матеріалом, наприклад, гранульованим пінополістиролом. За можливості відстань між двома панелями конструкції повинна дорівнювати чверті довжини хвилі максимальної амплітуди.

Ключові слова: захист від шуму, панель, резонансна частота, екранування.

Вступ

Дослідженню акустичних характеристик технічних засобів, зокрема будівельної техніки та розробленню заходів і засобів їх нормалізації приділяється багато уваги. У більшості це стосується капітального будівництва, дорожніх робіт тощо. Тобто роботи здійснюються на задалегідь підготовлених майданчиках, достатньо віддалених від житлової забудови. Але на сьогодні в Україні потребують ремонту і відновлення багато об'єктів інфраструктури, які постраждали внаслідок бойових дій та терористичних атак. Це заклади освіти, охорони здоров'я тощо. Такі об'єкти як правило, розташовані у місцях щільної забудови, тому шум будівельної техніки може негативно впливати не тільки на працюючих, а й на населення. При цьому, якщо шум середньої та високої частоти достатньо швидко згасає з відстанню, то низькочастотний звук та інфразвук розповсюджується на великі відстані й практично не поглинається будівельними конструкціями та іншими перешкодами, наприклад, зеленими насадженнями. Цьому аспекту захисту від шуму майже не приділяється уваги. Відомо, що захист від низькочастотних коливань дуже складний, тому для вирішення задач захисту людей від шуму необхідно визначити акустичні характеристики типового обладнання. Крім того, в умовах дефіциту електроенергії в Україні широко застосовуються електрогенератори резервного електроживлення. Їх шумові характеристики надаються виробниками у вигляді еквівалентних значень шуму. Але для його зниження необхідне визначення спектрального складу шуму, що дозволить розробити адекватні заходи захисту. Наведене обумовлює актуальність дослідження.

Аналіз публікацій з електромагнітної безпеки об'єктів енергетики. У літературних джерелах з

охорони праці у будівництві надано шумові характеристики будівельної техніки. Але ці роботи певним чином застаріли через зміну номенклатури технічних засобів. До того ж такі дані стосувалися стандартних умов капітального будівництва. Сучасні дослідження щодо рівнів шуму будівельної техніки свідчать, проблема захисту людей від акустичних впливів залишається [1, 2]. У цих роботах надані тільки еквівалентні рівні шуму за шкалою корекції «А», що ускладнює розроблення засобів екранування та шумопоглинання. В той же час європейські нормативні акти підвищують вимоги щодо рівнів шуму [3]. Санітарні норми України не регламентують саме будівельний шум, а інфразвук регламентується тільки як фактор його суттєвості – за різницею показів за лінійною шкалою та шкалою корекції «А» [4]. В останні роки багато уваги приділяється низькочастотному звуку та інфразвуку [5, 6]. Але ця проблема виникла через з'ясування факту генерації інфразвуку вітроелектростанціями [7]. Майже усі ці роботи розглядають вплив низькочастотного звуку та інфразвуку на людей, не визначаючи шляхів його зниження. Прикладна робота [8] свідчить, що сучасні композиційні матеріали мають певний ефект у низькочастотній області звукового спектра і забезпечують індекси зниження шуму 6–8 дБ. Але для інфразвуку дослідження не проводилися. Частково шляхи вирішення проблеми наведено у дослідженні [9]. Зокрема показано можливість екранування шуму як звукового діапазону, так і інфразвуку. У дослідженні [10] наведено розрахунковий апарат та засади проектування конструкції резонансного типу, які дозволяють поглинати акустичні хвилі звукового діапазону та інфразвук. Такі конструкції призначені для стаціонарного використання у будівлях. Але актуальною є задача розроблення засад забезпечення зниження шуму у нестаціонарних умовах.

Мета роботи – дослідити рівні та спектральний склад шуму будівельної техніки й допоміжних пристроїв та визначити засади зниження акустичного навантаження на працюючих і населення.

Викладення основного матеріалу

Для визначення переліку та вмісту організаційно-технічних заходів зі зниження будівельного шуму необхідно виміряти фактичне значення рівнів

шуму будівельної техніки. Ці вимірювання треба здійснювати принаймні у октавних смугах частот. Такі дані дозволяють більш коректно визначити засоби захисту, що обумовлене різними технічними рішеннями для екранування звуку різних частотних смуг.

Результати вимірювання рівнів шуму типового обладнання, що використовується в процесах відновлювальних робіт наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Рівні шуму технічних засобів, що використовуються на будівництві

Технічний засіб	Рівень звукового тиску, дБ, у октавних смугах із середньгеометричними частотами, Гц.									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	L _{екв} , дБА
Бетонозмішувач	101	96	90	88	91	87	78	74	72	86
Компресорна станція	104	95	92	93	94	97	95	92	91	94
Бетононасос	95	95	90	87	94	85	86	78	70	86
Вібромолот	95	102	97	101	99	102	101	98	92	98
Вібраційний брус	98	90	84	89	92	85	84	79	77	85
Екскаватор	102	94	90	88	87	92	90	87	78	90
Будівельний перфоратор	103	76	92	92	89	88	91	85	77	90

Відстань вимірювання складала 5 м. Як видно з наведених даних, рівні шуму перевищують гранично допустимі рівні як працюючих, так і для населення. При цьому шум кожного агрегату вимірювався окремо. За їх одночасної роботи еквівалентні значення зростають. Відстань вимірювань невелика, але дані табл. 1 свідчать, що найвищі значення шуму припадають на низькочастотну область звукового спектра. Коефіцієнти згасання низькочастотного шуму незначні, тому він поширюється на великі відстані. В той же час засоби екранування такого шуму мають малу ефективність через великі довжини хвиль у цій області спектра. Резонансна частота розраховується зі співвідношення:

$$f_r = \frac{K}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho_m b h}},$$

де K – порядок резонансної частоти ($K=1, 2, 3, \dots$), F – сила натягнення матеріалу панелі, ρ_m – густина матеріалу панелі, l – довжина, b – ширина, h – товщина панелі.

Таблиця 2 – Рівні шуму резервних електрогенераторів

Дизельні	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	L _{екв} , дБА
		92	94	90	85	78	74	65	65	62
Бензинові	84	86	72	88	105	97	100	102	98	92

Якщо використовувати одношарову панель, то її проектування доцільно здійснювати за певним алгоритмом, тобто у наступній послідовності.

На сітці координат по осі абсцис наносяться значення звуку для критичної частоти й її гармонік – $0,25f_c$; $0,5f_c$; f_c ; $2f_c$. По осі ординат – звукоізоляція R або індекси зниження звуку ΔL .

Для кожної з чотирьох частот – графічно отримуються значення R або ΔL .

Отримані чотири точки з'єднуються й отримується крива ефективності панелі у децибелах на октаву.

Значення $K=1$ відповідає мінімальній резонансній частоті. Поглинання відбувається для усіх частот, кратних мінімальній.

Було виконано вимірювання рівнів шуму дизельних та бензинових електрогенераторів. Найбільш типовими потужностями дизельних генераторів є 34–55 кВт, бензинових – 2–4 кВт. У табл. 2 наведено усереднені дані.

Наведені дані орієнтовні через усереднення показників по октавних смугах частот, але чітко простежуються певні закономірності. Рівні шуму бензинових генераторів набагато вищі за дизельні і в усіх випадках перевищують гранично допустимі рівні. При цьому для дизельних генераторів максимальні амплітудні звуки притаманні низькочастотній області звукового спектра.

Як зазначалося, для низькочастотної області звукового спектра доцільно використовувати резонансні захисні панелі. Для шуму середніх і високих частот доцільно використовувати звукопоглинальні матеріали й конструкції з них.

Емпірична формула для визначення критичної частоти:

$$f_c = 0,55 \frac{v_0^2}{h v_m},$$

де v_0 – швидкість звуку у повітрі, v_m – швидкість звуку у матеріалі, h – товщина панелі.

Якщо є потреба одночасної звукоізоляції у звуковому діапазоні та інфразвуковому діапазоні, то панель робиться двошаровою. При цьому друга панель (для інфразвуку) розташовується позаду першої відносно променів розповсюдження шуму. У цьому

випадку відстань між панелями можливо обрати такою, яка буде відповідати одній чверті звукової хвилі найбільшою амплітуди, що різко підвищить ефективність шумозахисту. Для підвищення ефективності конструкції проміжок між панелями доцільно заповнити шумопоглинальним неоднорідним матеріалом, наприклад, гранульованим пінополістиролом. Для екранування звуку електрогенераторів доцільно застосовувати конструкцію у формі паралелепіпеда. Єдиним обмеженням є необхідність забезпечення вентиляції та газовідводу від генератора.

Висновки

1. Виміряні значення шуму будівельної техніки у октавних смугах частот свідчать, що багатьох випадках є перевищення гранично допустимих рівнів.

У більшості випадків шум технічних засобів переважно низькочастотний. Це обумовлює розроблення засобів захисту працюючих з використанням конструкції резонансного типу.

2. Виміряні значення шуму електрогенераторів аварійного живлення. Встановлено, що дизельні генератори мають шумність, яка не перевищує гранично допустимі рівні. Бензинові генератори мають шумові характеристики, які значно перевищують граничні значення.

3. Розроблено послідовність проектування захисних панелей для екранування звуку та інфразвуку. Для проектування захисної конструкції необхідно мати дані щодо амплітудно-частотних характеристик шуму, що надасть можливість налаштувати захисні панелі на частоти максимальних амплітуд.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Волошкіна О.С., Ковальова А.В. (2021). Розрахунок виробничого ризику від шумового забруднення для безпеки працюючих на відкритому повітрі. Вісті Донецького гірничого інституту. Вип. 2 (49) С. 104 – 112. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2021-2-104-112>
2. Kovalova, A. (2021). Виробничий ризик від постійного шумового навантаження для робітників відкритого повітря. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, 4(66), 90-93. <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.4.090>
3. Environmental noise guidelines for the European region. 2018:160. World Health Organization. URL: <https://www.euro.who.int/en/publications/abstracts/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region-2018>
4. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Постанова Міністерство охорони здоров'я від 01.12.1999 № 37. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va037282-99#Text>
5. Myshchenko I., Nazarenko V., Stopa M., Maslakiewicz M. OCCUPATIONAL EXPOSURE TO INFRASONIC AND LOW FREQUENCY NOISE: ACTUAL PROBLEMS OF HYGIENIC STANDARDIZATION. Український журнал Охорона праці. 2021. 17 (4). PP. 235-244. <https://doi.org/10.33573/ujoh2021.04.235>.
6. Van Kamp I., van den Berg F. Health effects related to wind turbine sound, including low-frequency sound and infrasound. Acoustics Australia/ Australian Acoustical Society. 46(82). 2018. PP. 31-57. <https://doi.org/10.1007/s40857-017-0115-6>.
7. Swen M., Stefan H., Martin H., Susanne K. Can infrasound from wind turbines affect myocardial contractility? A critical review. Noise and Health. 2022. 24(113), PP. 96-106. URL: <https://eref.uni-bayreuth.de/id/eprint/73087/>
8. Glyva V., Lyashok J., Matvieieva I., Frolov V., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B., Nikolaiev K. Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Iss. 6/5 (96). P. 54–61.
9. Ткаченко Т.М., Бурдейна Н.Б., Ченчева О.О. Екранування електромагнітних полів та шуму у будівлях і спорудах. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2023. Т 2(72) – С. 186-189. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.2.186>.
10. V. Glyva, O. Zaporozhets, L. Levchenko, N. Burdeina, V. Nazarenko. Methodological Foundations Protective Structures Development For Shielding Electromagnetic And Acoustic Fields. Strength of Materials and Theory of Structures. 2023. Issue No. 110. PP. 245-255. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.245-255>

Received (Надійшла) 10.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.11.2024

Investigation of noise levels during the reconstruction and restoration of buildings and identification of noise reduction measures

V. Glyva, M. Kashlev, K. Tkachuk

Abstract. The levels of construction equipment used for repair and restoration of buildings within residential areas are investigated. It is established that in most cases there is an excess of maximum permissible values for populated areas. The analysis of measurements in octave frequency bands shows that low-frequency noise prevails. To effectively reduce this noise, it is advisable to use resonant absorbers. A calculation formula for determining the resonant frequency of a panel is presented. Adjusting the panel to the sound frequency of the highest amplitude values exceeds the effectiveness of protection. The noise levels of the most common backup power generators have been measured. It was found that the noise of diesel generators does not exceed the maximum permissible levels. The noise of petrol generators significantly exceeds the limit levels. The procedure for developing a protective structure is proposed. It is advisable to choose the frequency of sound with the highest amplitude as the critical frequency. To do this, it is advisable to obtain the most continuous sound spectrum at the preliminary design stage. A two-layer panel is used for simultaneous sound and infrasound shielding. Each layer (panel) is tuned to a specific frequency – resonant and critical. This makes the structure broadband. To increase the efficiency of the structure, the gap between the two panels should be filled with sound-absorbing material, such as granular polystyrene foam. If possible, the distance between the two panels should be a quarter of the wavelength of the maximum amplitude.

Keywords: noise protection, panel, resonant frequency, shielding.

В. О. Компанієць, П. Є. Пустовойтов

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

МЕТОД МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ САМОПОДІБНОГО ТРАФІКУ У ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

Анотація. Висвітлено новий підхід до вирішення проблеми адекватного моделювання мережевого трафіку. Запропоновано новий метод, що дозволяє генерувати самоподібні потоки пакетів з довільним заданим ступенем самоподібності у інфокомунікаційних мережах. Метод базується на використанні розподілу Парето та методу максимальної правдоподібності для оцінки параметрів моделі. Отримані результати можуть бути використані для побудови більш реалістичних імітаційних моделей інфокомунікаційних мереж. Автори пропонують метод математичного апарату для процедури формування самоподібного трафіку, який полягає в створенні точної та ефективної моделі, що відображає реальні властивості самоподібності у потоках даних. Запропоновано ефективний інструмент для моделювання складних мережевих процесів, що дозволяє точніше прогнозувати поведінку інфокомунікаційної мережі та оптимізувати її роботу. У представленій статті запропоновано процедуру формування самоподібного трафіку на основі закону розподілу Парето. Цей закон обраний завдяки своїй здатності описувати випадкові величини з довгими хвостами, що притаманно багатьох реальних систем. Основним параметром, що визначає рівень самоподібності потоку, є параметр Херста, що дозволяє гнучко моделювати різні сценарії трафіку. Запропонована процедура є важливим інструментом для дослідників та інженерів, що займаються моделюванням та аналізом мережевого трафіку, може застосовуватися для моделювання трафіку у інфокомунікаційних мережах, що сприяє покращенню точності відтворення реальних умов роботи мереж.

Ключові слова: самоподібний трафік, параметр Херста, розподіл Парето, метод, інфокомунікаційна мережа.

Вступ

Актуальність дослідження. Дослідження математичних моделей самоподібного трафіку, що надходить до вузла інфокомунікаційної мережі, є надзвичайно актуальним у сучасних умовах зростання обсягів даних і складності мережевих систем. Самоподібність трафіку, що характеризується довготривалими залежностями та важкими хвостами розподілів, має істотний вплив на проектування, управління та оптимізацію мереж. Традиційні моделі, які припускають випадковість з короткотривалою пам'яттю, не можуть адекватно відобразити реальні умови роботи мереж, де трафік часто виявляє самоподібні властивості.

Актуальність цієї теми зростає на фоні швидкого розвитку технологій, таких як Інтернет речей, потокове відео та великі дані, які створюють нові виклики для мережевої інфраструктури. Моделі самоподібного трафіку дозволяють краще передбачити навантаження на вузли мережі, оптимізувати ресурси та покращити якість обслуговування. Точне моделювання таких явищ є ключовим для забезпечення стабільності та ефективності мережевих систем у реальних умовах. Крім того, розробка математичних моделей самоподібного трафіку допомагає у виявленні та вирішенні проблем, пов'язаних із затримками, перевантаженням та втратами пакетів у мережах. Моделі, що враховують самоподібність, забезпечують точніше прогнозування навантаження і дозволяють краще управляти ресурсами, що критично важливо для забезпечення надійності та ефективності сучасних інфокомунікаційних мереж.

Вивчення математичних моделей самоподібного трафіку також має велике значення для розробки нових алгоритмів і технологій управління мережами. Інновації в цій області можуть включати адаптивні

методи контролю трафіку, нові підходи до маршрутизації та управління якістю обслуговування, що забезпечують більш ефективне використання мережевих ресурсів та покращують загальну продуктивність мереж. Таким чином, дослідження математичних моделей самоподібного трафіку є важливим кроком до вдосконалення інфокомунікаційних мереж, забезпечення їх стабільності та ефективності, а також розробки нових технологічних рішень, які відповідають вимогам сучасних та майбутніх комунікаційних середовищ.

Огляд літератури. Математичний апарат марківських моделей доволі часто використовується для моделювання мереж. Марківські моделі є статистичними моделями, що використовуються в багатьох реальних застосуваннях та спільнотах. Використання марківських моделей стало переважати в останні десятиліття, що підтверджується великою кількістю опублікованих статей. У [1] розглянуто більш ніж 200 публікацій щодо марківських моделей, що були застосовані до різних сфер застосування. Стаття демонструє значні тенденції у дослідженнях варіантів марківських моделей та їх застосувань, але носить лише оглядовий характер. Так, за допомогою математичного апарату марківських ланцюгів стало можливим моделювати різні види трафіка та різні протоколи [2, 3].

При побудові марківських моделей функціонування інфокомунікаційних мереж традиційно припускають пуасонівський характер вхідного трафіку. Але, з виходом статті [4] таке припущення, щодо пуасонівського трафіку було розвінчано. Було показано, що реальний трафік має післядію, а для виміру рівня післядії трафіка стали використовувати параметр Херста H [5]. Такий трафік ще називають пачечним чи самоподібним. Це явище пояснюється наявністю довгої пам'яті в процесах, що генерують трафік, наприклад, при передачі великих файлів або

потоківому відео, де інтенсивність трафіку залишається високою протягом тривалих проміжків часу, створюючи ефект кластеризації та залежності між різними часовими інтервалами. У сучасних моделях мереж намагаються закладати властивість самоподоби до відповідних моделей. Наприклад, у [6] розглядаються засоби передбачення поведінки складної системи масового обслуговування із автокореляційним вхідним потоком, що має післядію, але така модель сильно залежить від якості даних.

Постановка мети та задач дослідження. Статистичні спостереження за мережним трафіком у реальних інфокомунікаційних мережах показали, що вхідний потік пакетів даних має властивість самоподібності. Більшою мірою властивість самоподібності виявляється у наявності післядії у випадковому характері трафіку. Це означає, що зростання навантаження в мережі може призвести до ще більшого збільшення навантаження надалі.

Аналітичний опис процесу функціонування інфокомунікаційної мережі із заданим значенням параметра самоподібності відсутній. У зв'язку з цим природним є використання імітаційних моделей. Для побудови адекватної імітаційної моделі необхідно імітувати мережевий трафік із фрактальною складовою.

Мета дослідження – розробити алгоритми та математичні інструменти, які дозволять генерувати та аналізувати трафік з властивостями самоподібності, такі як довгі хвости розподілів та автокореляційні структури. Це включає в себе **задачі** розробки нових методів для моделювання та оцінки параметрів самоподібності, що відповідають різним типам мереж та навантажень. Окрім цього, **задачі** також передбачають інтеграцію розроблених моделей у реальні сценарії мережевого управління, щоб перевірити їх ефективність у прогнозуванні навантаження, управлінні ресурсами та оптимізації якості обслуговування. Важливою частиною задачі є верифікація та калібрування математичного апарату на основі реальних даних, що дозволить забезпечити його практичну застосовність і точність у відображенні самоподібності трафіку в різних умовах мережної роботи.

Результати досліджень

Метод отримання випадкової послідовності інтервалів між пакетами. Перш ніж генерувати випадкову послідовність із післядією розглянемо метод отримання випадкової послідовності за будь-яким наперед заданим законом розподілу. Нехай випадкова величина X розподілена за деяким законом

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = y, \quad (1)$$

де $f(x)$ - щільність розподілу випадкової величини X . Функція розподілу $F(x)$ визначає ймовірність того, що випадкова величина X менша або дорівнює x .

Знайдемо тепер зворотну функцію $F^{-1}(u)$, яка визначається як така, що для всіх значень u з інтервалу $[0, 1]$ виконується рівняння

$$F^{-1}(F(u)) = u. \quad (2)$$

Далі для генерування випадкового числа U з рівномірного розподілу на інтервалі $[0, 1]$ використо-

вується генератор рівномірних випадкових чисел. У свою чергу, за допомогою зворотної функції отримуємо значення випадкової величини x , які отримуються з $F^{-1}(u)$, рис. 1.

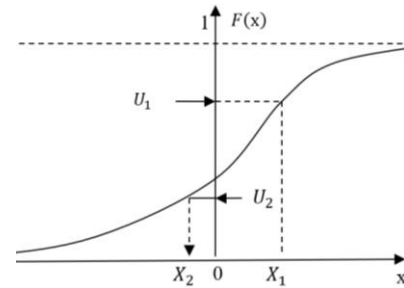


Рис.1. Отримання випадкового значення за заданим законом розподілу

За визначенням закон розподілу $F(u)$ випадкової величини $U \in$

$$F(y) = P(U < y) = P(F(u) < F(x)) = P(U < x) = F(x) = y, \quad (3)$$

причому $0 \leq y \leq 1$.

Використовуючи (3), напишемо

$$P(U < x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = y. \quad (4)$$

Тоді, якщо $y_1, y_2, y_3, \dots, y_k, \dots$ - послідовність значень випадкової величини U рівномірно розподіленої в інтервалі $[0, 1]$, то, вирішуючи рівняння (4) щодо верхньої межі x , отримаємо послідовність $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k, \dots$ випадкових чисел, розподілених відповідно до (1), причому

$$F(x_i) = \int_{-\infty}^{x_i} f(x) dx = y_i, \quad i = 1, 2, \dots \quad (5)$$

Метод отримання випадкової послідовності із післядією. Розглянемо спосіб формування випадкової послідовності, яка має властивість самоподоби. Для генерації потоку з післядією використано розподіл випадкової величини Парето, який має важкий хвіст. Використовуємо (5) для отримання випадкових величин, розподілених згідно із законом Парето. Тоді:

$$F(x) = 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^\alpha, \quad (6)$$

а рівняння (5) набуває вигляду

$$1 - \left(\frac{k}{x_i}\right)^\alpha = u_i. \quad (7)$$

Звідси маємо

$$\begin{aligned} \left(\frac{k}{x_i}\right)^\alpha &= 1 - u_i, & \frac{k}{x_i} &= (1 - u_i)^{\frac{1}{\alpha}}, \\ x_i &= \frac{k}{(1 - u_i)^{\frac{1}{\alpha}}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Тепер, формуючи послідовність випадкових чисел u_i , рівномірно розподілених в інтервалі $[0, 1]$, та підставляючи їх у (8), розрахуємо шукану послідовність Парето-розподілених випадкових величин.

Метод моделювання впливу рівня самоподоби на випадковий трафік згідно до заданого параметру Херста. Запропоновано процедуру визначення залежності параметрів (α, k) Парето – розподілу та параметра Херста H [7]. Для заданого

значення параметра Херста використовуємо формулу автокореляційної функції для самоподібного процесу

$$r(\tau) = (1 + \tau)^{-(1-H)}. \quad (9)$$

Подальша послідовність дій така:

а) для сукупності часових інтервалів, що не перетинаються, формується обумовлена автокореляційною функцією послідовність корельованих випадкових величин, що задають кількість повідомлень у кожному інтервалі;

б) відповідно до отриманого розподілу числа пакетів у кожному інтервалі формується випадкова послідовність довжин проміжків між пакетами з післядією;

в) послідовність випадкових проміжків між моментами надходження пакетів, що виникає, утворює потік із заданим параметром самоподібності;

г) отриманий самоподібний потік статистично обробляється, у результаті будується гістограма відносних частот появи проміжків заданої довжини;

д) методом найменших квадратів здійснюється вибір відповідних параметрів Парето-розподілу, що апроксимує гістограму, які ставляться у відповідність до заданого значення. Н.

Далі описана процедура повторюється для нового значення Н. Результати, що отримуються при цьому, використовуються для відшукування залежності параметрів Парето – розподілу від чисельного значення параметра Н.

Висновки

Запропоновано процедуру формування самоподібного потоку на основі закону розподілу Парето. Рівень самоподібності одержуваного потоку визначається параметром Херста. Процедура може бути використана для опису трафіку при побудові імітаційної моделі функціонування інфокомунікаційної мережі.

Процедура формування самоподібного потоку заснована на генерації випадкових чисел відповідно до закону розподілу Парето. Цей розподіл вибраний через його властивість створювати довгі хвости, що є характерним для багатьох реальних систем. За допомогою параметра Херста визначається ступінь самоподібності потоку, що дозволяє моделювати різні сценарії трафіку. Представлені в роботі алгоритми та математичні інструменти, демонструють, як змінюється поведінка потоку при різних значеннях параметра Херста, що надає можливість краще зрозуміти і передбачити роботу інфокомунікаційних мереж.

Використання самоподібних потоків дозволяє більш точно відтворювати умови реальних мереж, що сприяє розробці ефективних алгоритмів та стратегій управління трафіком. Застосування параметра Херста для регулювання рівня самоподібності потоку додає гнучкості в моделюванні, дозволяючи адаптувати модель під специфічні потреби та умови експлуатації мережі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bhavya Mor, Sunita Garhwal & Ajay Kumar / A Systematic Review of Hidden Markov Models and Their Applications.
2. Pustovoirov, P. Assessment of QoS indicators of a network with UDP and TCP traffic under a node peak load mode. / Pustovoirov, P., Voronets, V., Voronets, O., Sokol, H., Okhrymenko, M. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2024. V 1. № 4(127). P. 23-31.
3. Пустовойтов П.Є. Модель вузла електронної комунікації, що обслуговує tcp-трафік / Воронець В.М., Пустовойтов П.Є. // Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава, 2023. № 4(74). С. 152-155.
4. Will E. Leland, Walter Willinger, Murad S. Taqqu, Daniel V. Wilson / On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version) // IEEE/ACM Transactions on Networking, 1994.
5. Wojciechowski, Krzysztof, and Rafal Kruczek. The Hurst Parameter: Theory and Practice. Springer, 2020. ISBN 978-3-030-41411-6.
6. Zhen Chen, Yaping Li, Tangbin Xia, Ershun Pan / Hidden Markov model with auto-correlated observations for remaining useful life prediction // ScienceDirect, 2022. с.1-15.
7. G. Millán, "Estimation of Hurst exponent in self-similar traffic flows," 2021, arXiv:2103.08592.
8. Millán G., Lefranc G., Osorio-Comparán R. The Associative Multifractal Process: A Novel Model for Computer Network Traffic Flows // Computing Research Repository, 2021. – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.14666>.

Received (Надійшла) 23.08.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.10.2024

Method of mathematical modeling of self-similar traffic in infocommunication networks

Volodymyr Kompaniiets, Pavlo Pustovoirov

Abstract. This article presents a new approach to solving the problem of adequate network traffic modeling. A novel method is proposed that allows generating self-similar packet flows with an arbitrarily specified degree of self-similarity in infocommunication networks. The method is based on the use of the Pareto distribution and the maximum likelihood method for estimating model parameters. The obtained results can be used to build more realistic simulation models of infocommunication networks. The authors propose a mathematical apparatus method for the procedure of forming self-similar traffic, which consists in creating an accurate and efficient model that reflects the real properties of self-similarity in data flows. An effective tool for modeling complex network processes is proposed, allowing more accurate prediction of infocommunication network behavior and optimization of its operation. The article presents a procedure for forming self-similar traffic based on the Pareto distribution law. This law is chosen due to its ability to describe random variables with long tails, which is inherent in many real systems. The main parameter determining the level of flow self-similarity is the Hurst parameter, which allows flexible modeling of various traffic scenarios. The proposed procedure is an important tool for researchers and engineers engaged in modeling and analyzing network traffic, can be used to model traffic in infocommunication networks, contributing to improving the accuracy of reproducing real network operating conditions.

Keywords: self-similar traffic, Hurst parameter, Pareto distribution, method, infocommunication network.

Г. Я. Криховецький¹, Г. М. Зубрицький², В. В. Скороделов², О. І. Баленко²

¹ Науково-дослідний інститут військової розвідки, Київ, Україна

² Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФІКА РОЗПОДІЛЕНОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ

Анотація. Запропонований підхід до визначення статистичних характеристик мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі (РТКМ). Використання властивостей самоподібності дозволило одержати статистичну модель мережного процесу, якщо задати скінченновимірний розподіл його відліків. Наведені результати теоретичних досліджень щодо визначення статистичних характеристик трафіка РТКМ та меж змін властивостей трафікового процесу. Побудована відповідна математична модель, що є базовою для отримання статистичних характеристик. Всі розглянуті статистичні характеристики однозначно визначаються за допомогою всього трьох параметрів: фрактальна експонента; інтенсивність точкового процесу; фрактальний час установаження. Ідентифікація цих параметрів є достатньою для побудови моделей статистично самоподібних процесів у РТКМ.

Ключові слова: трафік, фрактал, розподілена телекомунікаційна мережа, довготривала статистична залежність, чинник Фано.

Вступ

Якість процесу управління в сучасних мультисервісних розподілених телекомунікаційних мережах суттєво залежить від двох основних факторів: моделі обслуговування та моделі трафікового проектування [1]. Модель обслуговування визначає різні класи обслуговування та встановлює розподіл мережних ресурсів [2]. Модель трафікового проектування використовується з метою визначення потрібної ємності мережних ресурсів [3] та базується на підмоделях відповідних мережних процесів.

Для моделювання мережних процесів традиційно використовувалися класичні моделі теорії масового обслуговування у рамках кореляційної теорії. Проведений аналіз експериментальних даних [4] вказує на недостатню точність таких моделей щодо задач дослідження й ідентифікації специфічних особливостей процесів у РТКМ. Це насамперед відноситься до прояву різних форм схованих періодичностей і довготривалих статистичних залежностей [5], які мають загальний механізм виникнення, обумовлений процесами агрегування, що на локальному рівні розгляду окремих мережних з'єднань носять мультиплікативний, а на рівні об'єднаних мереж – адитивний характер [6]. Дослідження показують, що моделями багатьох мережних явищ можуть бути процеси, статистична структура яких характеризується степеневим загасанням кореляційних зв'язків і обумовленою цим процесом масштабною інваріантністю [7]. При цьому властивості мережного трафіка потрібно пов'язувати із застосовуваними в комп'ютерних мережах методами пакетної комутації та процесами, що виникають при такій комутації. Крім того, слід зазначити, що трафік сучасних мультисервісних цифрових телекомунікаційних мереж з інтеграцією служб у багатьох випадках має фрактальний характер [7].

Такий трафік породжується випадковими подіями, що є локалізованими в окремі моменти часу [8], тобто фрактальні властивості процесів потребують аналізу не тільки перших, але й других статистичних моментів виникаючих процесів [9], а також

непараметричних статистик другого порядку (наприклад, спектральної щільності, кореляційної функції кількості відліків, нормованої дисперсії кількості відліків, коефіцієнта кореляції тощо), які дозволяють визначити характеристики самоподібності трафіка [10]. Тому мережному трафіку можна зіставити стохастичні процеси із властивістю масштабною інваріантності, яка виникає при агрегуванні достатньої кількості точкових відліків, що дозволяє використовувати методи фрактального аналізу та застосовувати різні ймовірнісні методи для оперативного прогнозування процесів за допомогою моделей з мінімальною кількістю настроюваних параметрів [11]. Отже, досягнення необхідної якості процесу управління РТКМ потребує розробки конструктивних математичних моделей мережних процесів, на базі яких можна промоделювати трафік, адекватний реальному мережному трафіку. Для цього потрібно мати оцінку його статистичних характеристик. Тому **метою даної статті** є розробка підходу до визначення статистичних характеристик мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі, який враховує фрактальний характер існуючого процесу.

Результати досліджень

Для дослідження й ідентифікації моделі трафіка розглянемо стаціонарний випадковий процес $\{\xi_k\}$, у якому інтервали між подіями є незалежними випадковими величинами. Використання властивостей самоподібності дозволяє одержати статистичну модель мережного процесу, якщо задати скінченновимірний розподіл його відліків. Реалізацію ординарного точкового потоку можна подати у вигляді неспадної ступінчастої функції, що набуває тільки невід'ємних цілочисельних значень. Моменти зміни цієї функції є випадковими величинами, а величина приросту дорівнює одиниці, тобто

$$N_\tau = \sum_{j \in P_\tau} e(t - \tau_j),$$

де τ_j – момент приходу j -го пакета; P_τ – множина пакетів, що надійшли за час τ ; e – булева функція, яка

дорівнює одиниці тільки при $t \geq \tau_j$. Потіки відновлення – ординарні точкові процеси, можна описати за допомогою характеристичного $\theta(V, T)$ та справляючого $L(u, T)$ функціоналів. Характеристичний функціонал є узагальненням Фур'є-перетворення щільності ймовірності скінченновимірного випадкового точкового потоку $\{\xi(t_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ при збільшенні кількості його відліків, коли $n \rightarrow \infty$, тобто

$$\theta(V, T) = M \left[\exp \left(\int_0^T V(t) \xi(t) dt \right) \right], \quad (1)$$

де $M\{\cdot\}$ – математичне сподівання; $V(t)$ – допоміжна функція.

Для опису локальних характеристик точкових процесів використовуються моментні $f_n(\cdot)$ і кореляційні $g_n(\cdot)$ функції, або відповідно функції щільності і кореляції щільності порядку n . Справляючий функціонал можна розрахувати як [2]

$$L(u, T) = M \left[\prod_{i=1}^n (1 + u(t_i)) \right], \quad (2)$$

де $u(t_i)$ – допоміжна функція, що обчислюється в точках появи подій t_i , що дає змогу одержати розкладання досліджуваного сигналу за системою базисних функцій f_n і g_n , за допомогою яких можна вивчати властивості випадкової інтенсивності точкового процесу.

При цьому слід зважати, що реалізація випадкової інтенсивності є потоком дельта-імпульсів як результат диференціювання випадкового точкового процесу N_τ , тобто

$$\xi(t) = \frac{dN}{dt} = \sum_i \delta(t - t_i), \quad (3)$$

де t_i – координата появи точки (пакет i) на часовій осі; $\delta(\cdot)$ – дельта-функція Дірака.

Використовуючи фільтруючі властивості дельта-функції, можна отримати співвідношення, що зв'язує характеристичний $\theta(V, T)$ та справляючий $L(u, T)$ функціонали:

$$\theta(V, T) = L e^{jV(t)-1}. \quad (4)$$

Тому з урахуванням виразів для характеристичного та справляючого функціоналів у формі функціональних рядів вигляду:

$$\theta(V, T) = \exp \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{j^n}{n!} \int_0^T \dots \int_0^T k_n(t_1, \dots, t_n) \prod_{r=1}^n V(t_r) dt_1 \dots dt_n \right);$$

$$L(u, T) = \exp \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \int_0^T \dots \int_0^T g_n(t_1, \dots, t_n) \prod_{r=1}^n u(t_r) dt_1 \dots dt_n \right)$$

одержимо такі співвідношення, що зв'язують характеристики точкових потоків:

$$k_1(t) = g_1(t);$$

$$k_2(t_1, t_2) = g_1(t_1) \delta(t_1 - t_2) + g_2(t_1, t_2). \quad (5)$$

Ідентифікацію такої моделі графіка будемо проводити з урахуванням (3), розглядаючи статистики тільки другого порядку, зважаючи на те, що вони не залежать від поточного часу, а їх значення визначаються величиною $\tau = t_2 - t_1$, тому з (5) впливають такі співвідношення:

$$k_1 = g_1 = f_1 = \text{const}; \quad k_2(\tau) = \lambda \delta(\tau) + g_2(\tau), \quad (6)$$

де λ – інтенсивність точкового процесу.

З урахуванням рівностей

$$f_2(t_1, t_2) = f(t_2|t_1) f_1(t_1), \quad f(t_2|t_1) = f(t_2 - t_1) = f(\tau)$$

представимо функцію $g_2(\tau)$ як

$$g_2(\tau) = f_2(t_1, t_2) - f_1^2 = \lambda(f(t_2|t_1) - \lambda) = \lambda(f(\tau) - \lambda).$$

Умовна функція щільності ймовірності характеризує ймовірність появи точки в околі моменту часу t_2 за умови існування точки у момент часу t_1 , $t_2 > t_1$. Ця функція може бути визначена з інтегрального рівняння відновлення, яке для стаціонарних точкових процесів має вигляд:

$$f(\tau) = \psi(\tau) + \int_0^{\tau} \psi(\tau - t) f(t) dt, \quad (7)$$

де $\psi(\tau)$ – щільність ймовірності часових інтервалів між точками.

Застосовуючи до рівняння (6) перетворення Фур'є, одержуємо вираз для спектральної щільності центрованої складової випадкової інтенсивності досліджуваного точкового процесу

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} k_2(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau =$$

$$= \lambda + \int_{-\infty}^{\infty} g_2(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau = \lambda + S_1(\omega). \quad (8)$$

Використовуючи введені позначення, вираз для кореляційної функції $G_N(\tau)$ можна записати як

$$G_N(\tau) = m_2(\tau) = k_2(t_1, t_2) + k_1(t_1) + k_2(t_2),$$

а враховуючи (6), отримаємо

$$G_N(\tau) = k_2(\tau) + k_1^2 = k_2(\tau) + \lambda^2 =$$

$$= \lambda \delta(\tau) + g_2(\tau) + \lambda^2 = \lambda \delta(\tau) + R_1(\tau), \quad (9)$$

де $R_1(\tau) = g_2(\tau) + \lambda^2$ – модулююча складова моментної функції; $\tau = t_2 - t_1$ – інтервал кореляції подій.

Для фрактальних процесів кореляційна функція другого порядку $g_2(\tau)$ має вигляд степеневий спадної функції

$$g_2(\tau) = \lambda^2 \left(|\tau|/\tau_0 \right)^{\alpha-1} \quad (10)$$

з дробовим показником степеня $\alpha < 1$, яка є джерелом точкових процесів із протяжною статистичною залежністю (ПСЗ).

Для визначення чисельних характеристик властивостей масштабної інваріантності використовуються й інші статистики відліків, наприклад, чинник Фано $F(T)$. Із виразів (7) та (9):

$$\begin{aligned}
F(T) &= D(T)(\lambda T)^{-1} = 2(\lambda T)^{-1} \int_0^T (T - \tau) k_2(\tau) d\tau = \\
&= 2(\lambda T)^{-1} \int_0^T (T - \tau) (G_N(\tau) - \lambda^2) d\tau = \quad (11) \\
&= 2(\lambda T)^{-1} \left(\int_0^T (T - \tau) \lambda \delta(\tau) d\tau + \frac{\lambda^2}{\tau_0^{\alpha-1}} \int_0^T (T - \tau) \tau^{\alpha-1} d\tau \right).
\end{aligned}$$

Зважаючи на те, що перший інтеграл у правій частині виразу (11) на підставі фільтруючих властивостей дельта-функції дорівнює $\lambda T/2$, а після обчислення другого інтеграла одержуємо величину $\lambda^2 T^{\alpha-1} / (\alpha(1+\alpha)\tau_0^{\alpha-1})$, а вираз для чинника Фано:

$$F(T) = 1 + (T/T_0)^\alpha; \quad T_0^\alpha = \frac{1}{2} \alpha(1+\alpha) / (\lambda \tau_0^{1-\alpha}), \quad (12)$$

де T_0 – фрактальний час; α – параметр.

Аналогічно можна одержати вираз для кореляційної функції кількості відліків $C(k; T)$ при $k \geq 1$:

$$\begin{aligned}
C(k; T) &= \int_{-T}^T (t - |\tau|) k_2(kT - \tau) d\tau = \\
&= \int_{-T}^T (T - |\tau|) (G_N(kT - \tau) - \lambda^2) d\tau = \\
&= \lambda \int_0^T (T - \tau_1) \delta(kT - \tau_1) d\tau_1 + \lambda \int_0^T (T - \tau_1) \delta(kT + \tau_1) d\tau_1 + \quad (13) \\
&\quad + \frac{\lambda^2}{\tau_0^{\alpha-1}} \int_0^T (T - \tau) (kT - \tau)^{\alpha-1} d\tau + \\
&\quad + \frac{\lambda^2}{\tau_0^{\alpha-1}} \int_0^T (T - \tau_1) (kT + \tau_1)^{\alpha-1} d\tau_1 = J_1 + J_2 + J_3 + J_4,
\end{aligned}$$

де $J_1 + J_2 = 0$ (враховуючи фільтруючі властивості дельта-функції), а інтеграли J_3 і J_4 дорівнюють:

$$\begin{aligned}
J_3 &= \frac{\lambda^2}{\tau_0^{\alpha-1}} \int_0^T (T - \tau) (kT - \tau)^{\alpha-1} d\tau = \\
&= \frac{\lambda^2 T^{\alpha+1}}{\tau_0^{\alpha-1}} \left(\left(\frac{1}{\alpha} k^\alpha - (k-1)^\alpha \right) + \frac{1}{\alpha} (k-1)^\alpha + \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{\alpha(1+\alpha)} \left((k-1)^\alpha - k^{\alpha+1} \right) \right), \\
J_4 &= \frac{\lambda^2}{\tau_0^{\alpha-1}} \int_0^T (T - \tau_1) (kT + \tau_1)^{\alpha-1} d\tau_1 = \\
&= \frac{\lambda^2 T^{\alpha+1}}{\tau_0^{\alpha-1}} \left(\left(\frac{1}{\alpha} (k+1)^\alpha - k^\alpha \right) - \frac{1}{\alpha} (k+1)^\alpha + \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{\alpha(1+\alpha)} \left((k+1)^{\alpha+1} - k^{\alpha+1} \right) \right),
\end{aligned}$$

тобто

$$\begin{aligned}
C(k; T) &= J_3 + J_4 = \\
&= \frac{1}{2} \lambda T \left(\frac{T}{T_0} \right)^\alpha \left((k+1)^{\alpha+1} - 2k^{\alpha+1} + (k-1)^{\alpha+1} \right) \quad (14)
\end{aligned}$$

Згідно з (9) спектральну щільність є такою:

$$\begin{aligned}
S_N(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} G_N(\tau) \exp\{-j\omega\tau\} d\tau = \quad (15) \\
&= 2\pi\lambda^2 \delta(\omega) + \lambda \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-\alpha} + \lambda,
\end{aligned}$$

де $\omega_0^\alpha = 2\lambda \cos\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right) \Gamma(\alpha) \cdot \tau_0^{1-\alpha}$; $\Gamma(\alpha)$ – гамма функція, або

$$S_N(\omega) = S_1(\omega) + \lambda, \quad (16)$$

де $S_1(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_1(\tau) \exp\{-j\omega\tau\} d\tau = 2\pi\lambda^2 \delta(\omega) + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-\alpha}$ – спектральна щільність модулюючого сигналу. Вважаючи, що $S_N(\omega) = 2\pi\lambda^2 \delta(\omega) + S(\omega)$, де $S(\omega)$ – спектральна щільність центрованої складової випадкової інтенсивності точкового процесу, визначимо

$$T_0^\alpha = \frac{1}{2} \frac{\alpha(1+\alpha)}{\lambda \tau_0^{1-\alpha}}; \quad \omega_0^\alpha = 2\lambda \cos\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \Gamma(\alpha) \cdot \tau_0^{1-\alpha},$$

а також зв'язуюче їх співвідношення

$$\omega_0^\alpha T_0^\alpha = \cos(\pi\lambda/2) \Gamma(\alpha + 2).$$

Параметри T_0 , τ_0 та ω_0 характеризують межі, у яких статистики другого порядку зберігають масштабно-інваріантні властивості. Використаємо оцінку нормованої кореляційної функції трафіка

$$\begin{aligned}
r(k; T) &= \frac{C(k; T)}{D(T)} = \quad (17) \\
&= \frac{T^\alpha}{2(T^\alpha + T_0^\alpha)} \left((k+1)^{\alpha+1} - 2k^{\alpha+1} + (k-1)^{\alpha+1} \right).
\end{aligned}$$

Ступеневий характер загасання $r(k; T)$ вказує на фрактальний характер одержаної кореляційної залежності, причому цей характер виявляється тим більшою мірою, чим більше значення інтервалу відліку T по відношенню до фрактального часу установа процесу T_0 . Така асимптотична властивість самоподібності є і у середньозважених відліках трафіка на n непересічних інтервалах тривалістю T :

$$\begin{aligned}
x^{(m)} &= \{x_k^{(m)} : k = 0, 1, \dots, n, \dots\} = \\
&= \left\{ \frac{x_1 + \dots + x_m}{m}, \dots, \frac{x_{km+1} + \dots + x_{(k+1)m}}{m} \right\} = \frac{1}{m} \sum_{i=km+1}^{(k+1)m} x_i,
\end{aligned}$$

де m і k – відповідно параметри агрегування і зсуву. Для такого агрегованого процесу статистики другого порядку мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}
G^{(m)}(k; T) &= m^{-2} \int_{-mT}^{mT} (mT - |\tau|) (G(kTm - \tau) - \lambda^2) d\tau = \\
&= m^{-2} c(k, mT); \quad D^{(m)}(T) = m^{-2} C(0, mT); \quad (18) \\
r^{(m)}(k; T) &= \left(1 / \left(2 \left(1 + \left(\frac{T_0}{mT} \right)^\alpha \right) \right) \right) \times \\
&\quad \times \left((k+1)^{\alpha+1} - 2k^{\alpha+1} + (k-1)^{\alpha+1} \right).
\end{aligned}$$

При $m \rightarrow \infty$ коефіцієнт кореляції $r^{(m)}(k; T)$ вже не залежить від способу агрегування і тому зберігає свою структуру. Коефіцієнт кореляції не залежить від масштабуючого параметра m і має вигляд степеневі залежності

$$r^{(m)}(k; T) \sim \frac{1}{2} \left((k+1)^{\alpha+1} - 2k^{\alpha+1} + (k-1)^{\alpha+1} \right).$$

При великих m і з урахуванням (18) є справедливим такий асимптотичний вираз для дисперсії агрегованого процесу:

$$D^{(m)}(T) = \frac{\lambda m T}{m^2} \left(1 + (mT/T_0)^\alpha \right) = \lambda T \left(m^{-1} + (T/T_0)^\alpha m^{\alpha-1} \right) \sim \lambda T (T/T_0)^\alpha m^{\alpha-1}.$$

Значимо, що всі розглянуті вище статистичні характеристики однозначно визначаються за допомогою всього трьох параметрів: α – фрактальна експонента; λ – інтенсивність точкового процесу; T_0 – фрактальний час установлення. Тому ідентифікація цих параметрів є достатньою для побудови моделей статистично самоподібних процесів у РТКМ. Далі для підготовки до моделювання трафікового процесу необхідно визначити межі зміни його частотних та просторових властивостей.

Висновки

У статті запропонований підхід до визначення статистичних характеристик мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі. Використання властивостей самоподібності дозволило одержати статистичну модель мережного процесу, якщо задати скінченновимірний розподіл його відліків. Наведені результати теоретичних досліджень щодо визначення статистичних характеристик трафіка РТКМ та меж змін властивостей трафікового процесу. Побудована відповідна математична модель, що є базовою для отримання статистичних характеристик. Всі розглянуті статистичні характеристики однозначно визначаються за допомогою всього трьох параметрів: фрактальна експонента; інтенсивність точкового процесу; фрактальний час установлення. Ідентифікація цих параметрів є достатньою для побудови моделей статистично самоподібних процесів у РТКМ.

Напрямок подальших досліджень є розробка моделі обслуговування, яка буде динамічно визначати різні класи обслуговування та встановлювати розподіл мережних ресурсів з метою подальшого підвищення якості процесу управління в мультисервісних РТКМ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V. (2019), "Improving Big Data Centers Energy Efficiency: Traffic Based Model and Method", *Green IT Engineering: Social, Business and Industrial Applications. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8
2. Ross K.W. Multiservice Loss Models for Broadband Telecommunication Networks. – Springer-London, 1995. – 426 p.
3. Кучук Г.А. Управління трафіком мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі / Г.А. Кучук // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НіУ, 2007. – Вип. 2. – С. 18-27.
4. Кучук, Г.А. Розрахунок навантаження мультисервісної мережі [Текст] / Г.А. Кучук, Я.Ю. Стасєва, О.О. Болюбаш // Системи озброєння і військова техніка. – 2006. – No 4 (8). – С. 130 – 134.
5. Poroshenko A., Kovalenko A. Optimization of a basic network in audio analytics systems, *Advanced Information Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 23–28, 2023, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.1.04>
6. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. Сучасні інформаційні системи. 2018. Т. 2, No 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
7. Кучук Г. А., Можаяв О. О., Воробйов О. В. Метод прогнозування фрактального трафіка. Радіоелектронні та комп'ютерні системи. 2006. № 6 (18). С. 181–188.
8. Кучук, Г.А. Моделювання трафіка мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі [Текст] / Г.А. Кучук, І.Г. Кіріллов, А.А. Пашнев // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 9 (58). – С. 50 – 59.
9. Aqeel Abdulhusein M. A.-M., Smirnova T., Buravchenko K., Smirnov O., The method of assessing and improving the user experience of subscribers in software-configured networks based on the use of machine learning, *Advanced Information Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 49–56, 2023, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.2.07>
10. Зиков І. С., Кучук Н. Г., Шматков С. І. Синтез архітектури комп'ютерної системи управління транзакціями e-learning. Сучасні інформаційні системи. 2018. Т. 2, No 3. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.10>
11. Кучук Г.А. Метод дослідження фрактального мережного трафіка // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2005. – Вип. 5 (45). – С. 74-84.

Received (Надійшла) 30.08.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.11.2024

Method for determining statistical characteristics traffic of a distributed telecommunication network

H. Krykhovetskyi, H. Zubrytskyi, V. Skorodelov, O. Balenko

Abstract. The proposed approach to determining the statistical characteristics of a multiservice distributed telecommunication network (DTT). The use of self-similarity properties allowed us to obtain a statistical model of the network process if we set a finite-dimensional distribution of its samples. The results of theoretical studies on determining the statistical characteristics of DTT traffic and the limits of changes in the properties of the traffic process are presented. The corresponding mathematical model is constructed, which is the basis for obtaining statistical characteristics. All considered statistical characteristics are uniquely determined using only three parameters: fractal exponent; point process intensity; fractal settling time. Identification of these parameters is sufficient for building models of statistically self-similar processes in RTCM.

Keywords: traffic, fractal, distributed telecommunication network, long-term statistical dependence, Fano factor.

О. Л. Кузнецов¹, В. І. Васишин¹, О. В. Коломійцев², Ю. О. Болбас¹

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

² Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

МОЖЛИВОСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ СИСТЕМ РАДІОЗВ’ЯЗКУ ТА РАДІОЛОКАЦІЇ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

Анотація: Системи радіозв’язку та радіолокації функціонують в умовах впливу тропосферних неоднорідностей та підстильної поверхні, що є причиною виникнення флуктуацій фазового фронту електромагнітних хвиль. Зокрема, флуктуації фронту завадових хвиль призводять до зниження завадозахищеності даних систем. Предметом вивчення в статті є вплив флуктуацій фазового фронту хвилі активної маскувальної завади на ефективність її подавлення в системах радіозв’язку та радіолокації. Метою статті є оцінювання можливостей систем радіозв’язку та радіолокації щодо забезпечення заданої завадозахищеності в реальних умовах розповсюдження радіохвиль. Завданням є дослідження залежності ефективності подавлення активної завади від напрямку її приходу при різних розмірах та рознесеннях фазових центрів антен систем радіозв’язку та радіолокації, а також визначення пропозиції щодо її підвищення. В ході розв’язання вказаного завдання доведено перспективність використання в системах радіозв’язку та радіолокації у якості антенних систем адаптивних цифрових антенних решіток. За допомогою методів математичної статистики оцінено ступінь впливу флуктуацій фазового фронту активної завади в залежності від їх статистичних характеристик, що відповідають реальним умовам розповсюдження радіохвиль. Проаналізовано залежність коефіцієнта подавлення активної завади від ступеня впливу фазових флуктуацій в елементах приймальної апертури при фіксованих значеннях відхилень кута приходу завади від напрямку максимуму бічної пелюстки діаграми спрямованості антени. Проведено оцінювання вказаного коефіцієнта від розмірів та рознесення фазових центрів основної та допоміжної антен радіотехнічної системи. Визначено умови найкращого подавлення активної завади в системах радіозв’язку та радіолокації. Перспективним напрямком подальших досліджень може бути застосування отриманих результатів стосовно забезпечення заданої завадозахищеності вказаних систем в умовах впливу комбінованих активно-пасивних завад.

Ключові слова: адаптивна цифрова антенна решітка, активна маскувальна завада, завадозахищеність, коефіцієнт подавлення, підстильна поверхня, система радіозв’язку, система радіолокації, статистичні характеристики, тропосферні неоднорідності, фазовий центр, флуктуації фазового фронту.

Вступ

Забезпечення заданої завадозахищеності є необхідною умовою функціонування сучасних систем радіозв’язку та радіолокації. Реальні умови розповсюдження електромагнітної хвилі активної маскувальної завади, зокрема, вплив тропосферних неоднорідностей та підстильної поверхні, є причиною викривлення її фазового фронту та, як слід, зниження ефективності застосування пристроїв завадозахисту.

Аналіз ефективності застосування пристроїв, що забезпечують адаптацію до зовнішньої завадової обстановці в реальних умовах виконання радіотехнічних систем (РТС) завдань за призначенням є актуальним практичним завданням.

Завади завжди присутні в прийнятому коливанні. Їх класифікують за різними ознаками – природою виникнення, способом формування, ефектом впливу, структурою та направленістю випромінювання електромагнітних хвиль.

Найбільш ефективними щодо застосування є прямошумові завади. Їх вплив є еквівалентним збільшенню інтенсивності внутрішнього шуму приймального пристрою, на відміну від якого, інтенсивність зовнішньої завади з часом змінюється відповідно до форми і закону переміщення діаграми спрямованості антени (ДСА) РТС.

У свою чергу, збільшення спектральної густини потужності суми шумових коливань призводить до зменшення відношення сигнал-шум на виході схеми

обробки і, відповідно, до зниження якості обробки інформації. При недостатньому динамічному діапазоні приймального пристрою можливе обмеження суми корисного сигналу та шумів, що призводить до ще більшого зниження відношення сигнал-шум, аж до повного приглушення корисного сигналу. Тому, активні маскувальні завади скорочують зону дії РТС та ведуть до появи секторів її ефективного подавлення.

Турбулентність тропосфери призводить до флуктуацій її показника заломлення, що у свою чергу викликає фазові спотворення завадового сигналу, що розповсюджується крізь тропосферні неоднорідності. Згідно з експериментальними та теоретичними даними, у створенні фазових флуктуацій радіосигналів найбільший внесок вносять турбулентності тропосфери із зовнішнім масштабом від сотень метрів до одиниць кілометрів.

Сучасні активні станції зв’язку, радіолокатори та джерела активних завад випромінюють у простір сигнали порівняно великої потужності. Частина цієї потужності поглинається землею (морською) поверхнею, решта сигналу відбивається від неї та взаємодіє з прямим променем. Крім того, сигнали при розповсюдженні можуть відбиватися і від різних метеоутворень. Тобто, виникає багатопріміневе розповсюдження електромагнітних хвиль, при якому поле у місці прийому створюється у результаті складання декількох сигналів з різними значеннями фази, що приводить до спотворення фазового фронту сумарної завадової електромагнітної хвилі на вході антени.

Таким чином, розповсюдження завадового сигналу крізь неоднорідності тропосфери, відбиття від шорсткої поверхні й метеоутворень, є причиною виникнення фазових флуктуацій. При цьому, аналіз таких флуктуацій може проводитися тільки з використанням статистичних методів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Ефективність використання за призначенням систем зв'язку та радіолокації безпосередньо пов'язана із забезпеченням когерентності прийнятого радіосигналу [1–3]. Напрямок розвитку вказаних систем є реалізація в них технологій цифрової обробки інформації та впровадження у якості антенних систем цифрових антенних решіток (ЦАР) [4, 5]. Однак, на якість виконання завдань комунікаційними та РТС суттєвий вплив оказує стан середовища поширення радіохвиль, зокрема тропосфери Землі [6], що визначає певні особливості їх застосування [7].

Розповсюдження радіохвиль крізь тропосферні неоднорідності супроводжується ефектом флуктуацій їх фазового фронту, статистичні характеристики яких розглянуто у [2, 8]. Дані флуктуації здатні призвести до порушення когерентності прийнятого радіосигналу та суттєвого зниження точності визначення місцезнаходження об'єктів спостереження [9, 10], що вимагає їх врахування у відповідних алгоритмах обробки сигналу в системах з антенною решіткою [11]. При цьому, окрім впливу тропосфери, на якість обробки інформації суттєвий вплив може здійснювати неоднорідності земної (морської) поверхні [12].

Висвітлена проблема у повному обсязі відноситься до питань завадозахищеності РТС. Так, у [13–15] розглянуто вплив флуктуацій фронту завадової хвилі на ефективність її подавлення кореляційними пристроями завадозахисту та надано відповідні результати математичного моделювання.

Зокрема, у [16] проведено оцінювання часу настройки даних пристроїв на подавлення в умовах флуктуацій фазового фронту хвилі активної завади.

У [17] проаналізовано вплив цих флуктуацій на якість завадозахисту при різних співвідношеннях розмірів основної та допоміжної антен РТС.

У [18] визначено граничні розміри апертури даних антени за умовою наявності вказаного впливу.

Для конкретних зразків радіолокаційної техніки різних діапазонів довжин хвиль у [19] надано результати порівняння теоретичних та експериментальних оцінок ефективності ослаблення активних завад кореляційними автокомпенсаторами (АКП) даних зразків, а потенційні можливості ослаблення зовнішньої завади визначено у [20, 21].

Таким чином, доцільно здійснити подальше дослідження вказаних питань стосовно залежності ефективності подавлення активної завади від напрямку її приходу при різних розмірах та рознесеннях фазових центрів антен систем зв'язку і радіолокації з метою визначення пропозиції щодо її підвищення. При цьому, оцінювання слід провести стосовно сантиметрового, дециметрового та метрового діапазонів довжин хвиль, які є найбільш поширеними для систем зв'язку та радіолокації.

Метою статті є оцінювання можливостей систем радіозв'язку і радіолокації щодо забезпечення заданої завадозахищеності в реальних умовах розповсюдження радіохвиль.

Основний матеріал

Сучасні РТС представляють собою системи з цифровою обробкою інформації. При цьому, перспективним напрямком їх розвитку є використання у якості антенних систем адаптивних цифрових антенних решіток (АЦАР) [5].

Під АЦАР розуміються антенні решітки, в яких цифровими методами обробки інформації здійснюється у реальному масштабі часу аналіз обстановки та забезпечується адаптивне регулювання форми та просторової орієнтації ДСА для досягнення максимальної ефективності функціонування РТС за заданими критеріями.

У задачах зв'язку (радіолокації) оптимізується зона покриття (у радіолокації – зона огляду), оперативно перенацілюються приймально-передавальні промені у залежності від територіального розподілу абонентів (у радіолокації – об'єктів радіолокаційного спостереження). Набір променів синтезується за алгоритмами дискретного перетворення Фур'є.

Технологія АЦАР істотно поліпшує якість зв'язку та радіолокації в умовах багатопробного поширення радіохвиль та підвищує завадозахищеність систем при інтенсивній радіопротидії, а також сприяє підвищенню динамічного діапазону приймальних антен [5].

Так, при синфазному складанні сигналів, середня потужність шуму зростає пропорційно кількості каналів антенної решітки, а потужність сигналу зростає пропорційно квадрату амплітуди.

Таким чином, підвищується відношення сигнал-шум та, як слід, – динамічний діапазон. При цьому, «нулі» ДСА у напрямках на джерела завад формуються без «запливань» провалів, що звичайно має місце при недостатньому динамічному діапазоні приймального модуля (рис. 1).

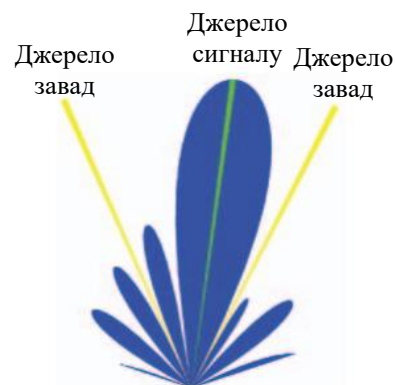


Рис. 1. Адаптивна ДСА з нулями у напрямку на джерела завад та максимумом на джерело сигналу (джерело: [5])

Результати оцінювання вказують на можливість подавлення активної шумової завади у АЦАР більш ніж на 30 дБ як за бічними, так і за головною пелюсткам ДСА в ідеальних умовах [5].

Застосування АЦАР на базових станціях зв'язку та радіолокаційних станціях дозволяють суттєво збільшити їх пропускну здатність за рахунок одночасного багатопроменового прийому сигналів в робочому секторі. При цьому, можливим є досягнення надвисокої роздільної здатності за кутовими координатами. Реальні умови розповсюдження завадової хвилі у тропосфері обумовлюють виникнення флуктуацій фази в елементах апертури антени, дисперсія σ_φ^2 та радіус кореляції ρ_φ яких визначаються виразами за наступним виглядом [14, 16]:

$$\sigma_\varphi^2 = 0,065 C_\varepsilon^2 k^2 d L_0^{5/3}, \quad (1)$$

$$\rho_\varphi = (0,27 C_\varepsilon^2 k^2 d)^{-3/5}, \quad (2)$$

де $C_\varepsilon^2 = 2 \sigma_\varepsilon^2 / L_0^{2/3}$ – структурна постійна; σ_ε^2 – дисперсія флуктуацій відносної діелектричної проникності тропосфери; L_0 – зовнішній масштаб турбулентності тропосфери; $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число; λ – довжина хвилі; d – шлях хвилі у тропосфері.

Для оцінки ступеня впливу флуктуацій фази радіосигналу, що обумовлені турбулентністю тропосфери Землі, на завадозахищеність РТС зручно користуватися співвідношенням, яке з урахуванням (1) та (2) має такий вигляд [14, 16]:

$$a_{\varphi n} = \frac{\sigma_\varphi^2}{\rho_\varphi} L = 32 L L_0^{3/5} \cdot \sigma_\varepsilon^{16/5} \left(d / \lambda^2 \right)^{8/5}, \quad (3)$$

де L – лінійний розмір антени.

Сигнали РТС поширюються у тропосфері, неоднорідності якої обумовлені нерегулярністю зміни відносної діелектричної проникності.

При цьому, значення дисперсії флуктуації діелектричної проникності тропосфери $\sigma_\varepsilon^2 = 0,25 \cdot 10^{-12}$ є мінімальним, а $\sigma_\varepsilon^2 = 9 \cdot 10^{-12}$ – максимально можливими [18]. На рис. 2 представлені графіки залежності параметра $a_{\varphi n}$, що розраховані за виразом (3), від довжини хвилі λ за умовою: $d = 50$ км та $L_0 = 1$ км.

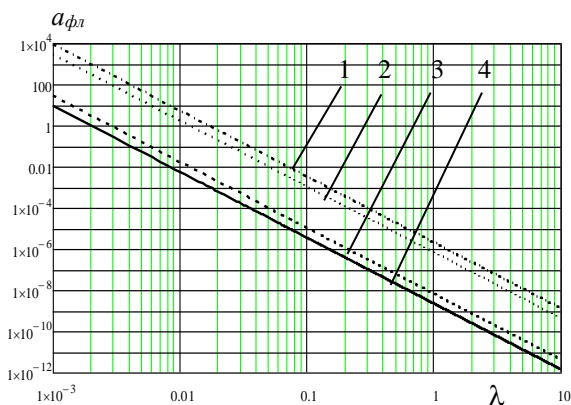


Рис. 2. Залежність параметра $a_{\varphi n}$ від довжини хвилі (джерело: [14])

Графіки отримані для наступних випадків:

$$1 - \sigma_\varepsilon^2 = 9 \cdot 10^{-12}, \quad L = 30 \text{ м};$$

$$2 - \sigma_\varepsilon^2 = 9 \cdot 10^{-12}, \quad L = 10 \text{ м};$$

$$3 - \sigma_\varepsilon^2 = 0,25 \cdot 10^{-12}, \quad L = 30 \text{ м};$$

$$4 - \sigma_\varepsilon^2 = 0,25 \cdot 10^{-12}, \quad L = 10 \text{ м}.$$

З графіків, що приведені на рис. 3 можливо заключити що, при фіксованій довжині хвилі, збільшення лінійного розміру антени у 3 рази, викликає зміну параметру $a_{\varphi n}$ до 10 дБ за потужністю. Тобто, близько 10 разів. У свою чергу, зміна дисперсії флуктуацій відносної діелектричної проникності тропосфери від мінімального до максимального значення призводить до зміни параметра $a_{\varphi n}$ приблизно до 30 дБ за потужністю. Тобто, близько 1000 разів. Зі зміною діапазону довжин хвиль від сантиметрового до метрового значення параметру $a_{\varphi n}$ знижується на десятки дБ за потужністю. Вказане свідчить про значно більший вплив на параметр $a_{\varphi n}$ умов поширення завад, ніж лінійного розміру антени. При цьому, зі зміною діапазону довжин хвиль від метрового до сантиметрового, значення параметру $a_{\varphi n}$ збільшується на десятки дБ за потужністю.

Таким чином, флуктуації фазового фронту хвилі завади при проходженні крізь тропосферу з випадковими неоднорідностями є більш значними, чим менше довжина хвилі РТС.

Вирішення завдання захисту РТС від активних маскувальних завад, що діють за головною та бічним пелюсткам ДСА, забезпечується застосуванням кореляційних АКП, побудованими за квадратурною або гетеродинною схемами. Вплив випадкових викривлень фазового фронту хвилі завади ускладнює роботу АКП та знижує якість завадозахисту РТС.

При застосуванні в РТС кореляційних АКП, орієнтації допоміжної компенсаційної антени РТС на джерело завади та лінійному законі убавання коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій, вираз коефіцієнта подавлення завади за [15] має наступний вигляд:

$$K_n = \frac{\sigma_{\text{вх}}^2}{\sigma_{\text{внх}}^2} = \frac{1 + a_{\varphi n} \text{ctg}^2 \psi}{a_{\varphi n}} \left[1 + \text{ctg}^2 \psi - \frac{L_1}{3L} \right]^{-1}, \quad (4)$$

де $\sigma_{\text{вх}}^2$ – дисперсія активної завади на вході АКП; $\sigma_{\text{внх}}^2$ – дисперсія активної завади на виході АКП; $\psi = bL/2$

– узагальнений кут; $b = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta$ – регулярна зміна фази; θ – кут між нормаллю до основної антени РТС і напрямом на джерело випромінювання; L_1 – розмір апертури допоміжної компенсаційної антени РТС. Мірою придушення зовнішньої активної шумової завади може служити її ослаблення, як величина обернена до коефіцієнта подавлення завади таким чином:

$$\xi = 1/K_n. \quad (5)$$

Розглядається випадок $\rho_\varphi \gg L$, оскільки лише за цієї умовою можливе реальне ослаблення завади.

Найбільш сприятливими умовами ослаблення впливу зовнішньої завади є такі:

– наявність тільки одного джерела зовнішньої завади;

– сталий режим;
– радіус кореляції фазових флуктуацій значно більше розміру апертури антени.

При відмінних умовах результати компенсації завади будуть тільки гірше. Це дозволяє вважати оцінки, зроблені при прийнятих умовах граничними.

У більшості практичних випадків виконується умова $a_{\phi l} \ll 1$. При невиконанні даної умови втрачає сенс сама задача компенсації зовнішньої завади. У свою чергу, умова $a_{\phi l} \ll \psi$ виключає випадок збігу кутів приходу активної завади та корисного сигналу.

При некорельованості за часом і простором власних шумів та некорельованості за часом, але корельованості за простором зовнішньої завади, оптимальна просторова обробка зводиться до такого [13].

Просторова обробка в основному каналі узгоджена з напрямом приходу корисного сигналу. Просторова обробка в допоміжному каналі повинна бути узгоджена з напрямом приходу зовнішньої завади, але використовується нерівномірний, залежний від інтенсивності зовнішньої завади амплітудний розподіл уздовж апертури допоміжної антени. Розміри апертури основної та допоміжної антен повинні бути рівними, а їх фазові центри суміщеними. При цьому, оцінка гранично можливого ослаблення зовнішньої завади має наступний вигляд [20]:

$$\xi = \frac{a_{\phi l}}{2} \frac{1 + 2\text{ctg}^2\psi}{1 + 2a_{\phi l} \text{ctg}^2\psi}. \quad (6)$$

Найбільше ослаблення має місце для максимумів бічних пелюсток ДС основної антени ($\text{ctg}\psi = 0$). Для нульових значень такої ДС ослаблення відсутнє, оскільки відсутня сама зовнішня завада.

На рис. 3 зображено залежність коефіцієнта подавлення активної завади, отриманого згідно (5) та (6), від узагальненого параметра $a_{\phi l}$ при фіксованих значеннях відхилень $\Delta\psi$ узагальненого кута Ψ від напрямку максимуму бічної пелюстки ДСА. Криві 1, 2, і 3 відповідають $\Delta\psi = 60, 45, 30^\circ$.

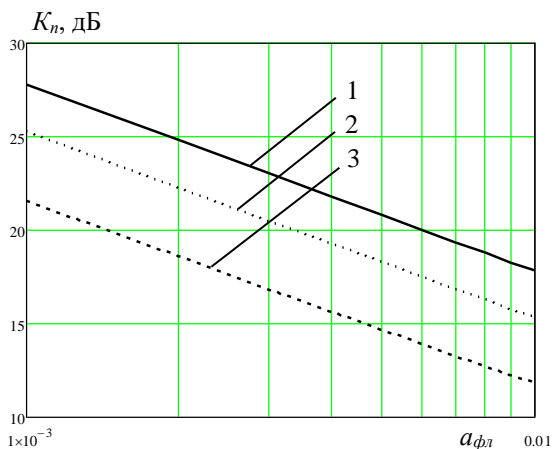


Рис. 3. Коефіцієнт подавлення завади в умовах флуктуацій фронту її хвилі (джерело: розроблено авторами)

За отриманими графіками можливо заключити, що коефіцієнт подавлення завади є практично прямо

пропорційним $a_{\phi l}$ та залежить від $\Delta\psi$. Порівняння графіків вказує на те, що при значеннях $a_{\phi l} \geq 0,01$ застосування засобів подавлення активних маскувальних завад не забезпечує необхідну завадозахищеність систем зв'язку та радіолокації.

Як доведено у [19] при переході від метрового до сантиметрового діапазону довжин хвиль, зменшення коефіцієнта подавлення активної завади може складати десятки дБ.

При цьому, тропосферні неоднорідності вносять значний вплив на зниження ефективності подавлення активної завади АКП у сантиметровому та дециметровому діапазонах довжин хвиль. У метровому діапазоні вплив тропосфери на зменшення ефективності подавлення активної завади є несуттєвим, але у цьому діапазоні довжин хвиль основний внесок у зниження коефіцієнта подавлення активної завади вносить вплив земної (морської) поверхні.

Доцільно проаналізувати наступні випадки рознесення фазових центрів ℓ основної та допоміжної антен систем радіозв'язку або радіолокації:

– апертури основної та допоміжної антен перекриваються повністю: $0 \leq \ell \leq (L - L_1)/2$;

– апертури антен перекриваються частково: $(L - L_1)/2 \leq \ell \leq (L + L_1)/2$;

– апертури антен не перекриваються: $\ell \geq (L + L_1)/2$.

Для довільного значення величини ℓ та спрямованості допоміжної антени на джерело завади коефіцієнт подавлення активної завади (4) перетворюється до наступного вигляду:

$$K_n = \frac{1 + a_{\phi l} \text{ctg}^2\psi}{a_{\phi l}} \left[1 + \text{ctg}^2\psi - \frac{L_1}{3L} + \zeta(\ell) \right]^{-1}. \quad (7)$$

Величина складової $\zeta(\ell)$ для розглянутих випадків визначається таким чином:

– $\zeta(\ell) = 0$ при $0 \leq \ell \leq (L - L_1)/2$;

– $\zeta(\ell) = \frac{L}{4L_1} \left(1 - \frac{L_1}{L} - \frac{2\ell}{L} \right)^2$ при $(L - L_1)/2 \leq \ell \leq (L + L_1)/2$;

– $\zeta(\ell) = \frac{2\ell}{L} - 1$ при $\ell \geq (L + L_1)/2$.

На рис. 4 представлені графіки залежності коефіцієнта подавлення завади від узагальненого кута Ψ , які відповідають випадкам: крива 1 – $\ell = 0$; крива 2 – $\ell = 5$; крива 3 – $\ell = 15$), за умовами: $L = L_1 = 10$ м, $a_{\phi l} = 0,01$. На рис. 5 наведено дані графіки при різних розмірах основної та допоміжної антен за умовою суміщення їх фазових центрів (крива 1 – $L = L_1$; крива 2 – $L = 2L_1$; крива 3 – $L = 10L_1$).

Крива 4 на рис. 4 та 5 відповідає оптимальній просторовій обробці згідно (5) та (6). За графіками, що наведені на рис. 4 можливо заключити, що при рознесеннях фазових центрів основної та допоміжної відбувається зменшення коефіцієнта подавлення завади.

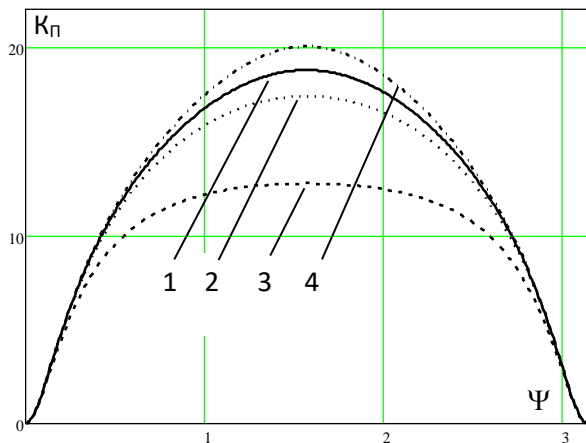


Рис. 4. Залежність коефіцієнта подавлення активної завади від узагальненого кута при різних рознесеннях фазових центрів антен (джерело: розроблено авторами)

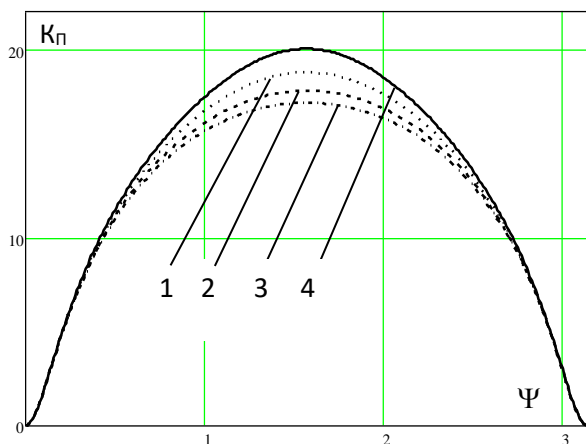


Рис. 5. Залежність коефіцієнта подавлення активної завади від узагальненого кута при різних розмірах антен (джерело: розроблено авторами)

В порівнянні з оптимальною просторовою обробкою (крива 4), відхилення обробки від оптимальної зменшує коефіцієнт подавлення на величину до 7 % (крива 1), зсув фазового центру додаткової антени на половину геометричного розміру основної антени призводить до зменшення коефіцієнта подавлення на

величину до 14 % (крива 2), а винесення фазового центру за межі антени на половину цього розміру – до 37 % (крива 3).

За графіками, що наведені на рис. 5 можливо заключити, що різниця розміру основної і додаткової антен компенсаторів впливає на коефіцієнт подавлення в меншому ступені ніж рознесення їх фазових центрів. У порівнянні з оптимальною просторовою обробкою (крива 4), при рівних розмірах антен зменшення коефіцієнта подавлення складає до 7 % (крива 1) При зменшенні розміру додаткової антени в 2 рази у порівнянні з розміром основної антени – до 11 % (крива 2). При зменшенні розміру додаткової антени у 10 разів й більше – до 15 % (крива 3).

Таким чином, для забезпечення умов найкращого подавлення активної завади розміри апертур основної та допоміжної антен систем радіозв'язку та радіолокації повинні бути рівними, а їх фазові центри – суміщеними, що дозволяє наблизити адаптивну просторову обробку до оптимальної.

Висновки

1. Розповсюдження завадової хвилі у реальних умовах є причиною виникнення флуктуацій її фазового фронту. При цьому, аналіз цих флуктуацій може проводитися тільки з використанням методів математичної статистики.

3. Тропосферні неоднорідності здатні суттєво знизити коефіцієнт подавлення активної завади для систем радіозв'язку та радіолокації сантиметрового діапазону довжин хвиль. При цьому, вони не оказують значного впливу на завадозахищеність даних систем у метровому діапазоні довжин хвиль, але у цьому діапазоні суттєвий вплив на їх завадозахищеність здійснює земна поверхня.

3. Для забезпечення умов найкращого подавлення активної завади розміри апертур основної та допоміжної антен систем зв'язку та радіолокації повинні бути рівними, а їх фазові центри – суміщеними. Просторова обробка у допоміжному каналі повинна бути узгоджена з напрямом приходу зовнішньої завади та використовуватись нерівномірний, залежний від інтенсивності зовнішньої завади амплітудний розподіл уздовж апертури допоміжної антени.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Радіоелектронні системи / Ю.М. Седишев, В.І. Карпенко, Д.В. Атаманський та ін. – Х: ХУПС, 2010. – 418 с. <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/117>.
2. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. / Под. ред. Я.Д. Ширмана. – М.: З.А.О. «МАКВИС», 1998. – 828 с. <https://b.twirpx.link/file/202213>.
3. Barton D.K. Radar Equations for Modern Radar / D.K. Barton. London: Artech House, 2012. 264 p. <https://www.scribd.com/document/293606437/Radar-Equations-for-Modern-Radar>.
4. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. – К.: КВІЦ, 2000. – 430 с. <https://b.eruditor.link/file/3693220>.
5. Слюсар В.И. Smart-антенны пошли в серию. *Електроніка: наука, технологія, бізнес.* – 2004. – № 2. С. 62-65 (2004). https://ru.wikipedia.org/wiki/Smart_антенна.
6. Рекомендация МСЭ-R P.834-6. Влияние тропосферной рефракции на распространение радиоволн [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.834-6-200701-I/en>.
7. 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. <https://journal-hnups.com.ua/index.php/nitps/article/view/317>.
8. Карлов В.Д., Родюков А.О., Пічугін .М. Статистичні характеристики радіолокаційних сигналів відбитих від місцевих предметів в умовах аномальної рефракції. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України.* – 2015. – Вип. 4 (21). – С. 71-74. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2015_4_19.

9. Karlov V., Kuznietsov O., Kolomiitsev O., Krasnoshapka I., Petrushenko I., Strutsinskiy O. Можливості врахування впливу тропосфери при вимірюванні кутових координат та висоти аеродинамічного об'єкта. *Системи управління, навігації та зв'язку*. – 2022. – Т. 3 (69). – С. 121-127. doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.3.121>.
10. Карлов В.Д., Кузнецов О.Л., Белоусов В.В., Тузіков С.А., Олешук М.М., Петрушенко В.М. Точність вимірювання кутових координат аеродинамічних об'єктів в умовах тропосферної рефракції. *Системи управління навігації та зв'язку*. – 2021. – № 1 (63). – С. 146-152. <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/issue/view/74/41>.
11. Кузнецов О.Л., Коломійцев О.В., Яровий С.В., Олійник Р.М., Живець Ю.М. Підвищення точності вимірювання кутових координат повітряних об'єктів при багатоканальному прийомі радіолокаційного сигналу. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. – 2021. – Вип. 3(9) – С. 65-72. <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/117>.
12. Рекомендация МСЭ-R P.1407-2. Многолучевое распространение и параметризация его характеристик. Электронный ресурс] – Режим доступа:https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1407-2-200503-S!!PDF-R.pdf.
13. Минервин Н.Н., Васюта К.С., Шумейко И.Е. Влияние флуктуаций фронта волны помехового сигнала на эффективность его подавления. *Радиотехника*. – 2004. – Вып. 136 – С. 95-101. <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/d1b8e07b-9480-49da-a869-e7dc86104a9f/content>.
14. Кузнецов О.Л., Таршин В.А., Шумейко И.С. Анализ влияния флуктуаций фронта волны активной завады на качество ее подавления корреляционным автокомпенсатором шляхом математического моделирования его работы. *Системи управління навігації та зв'язку* – 2007. – Вип. 3 – С. 132-135. <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/about>.
15. Минервин Н.Н. Влияние случайных искажений в тропосфере помеховой волны на эффективность ее подавления корреляционным автокомпенсатором. *Радиотехника*. – 2006. – Вып. 147, С. 149-156. <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/d1b8e07b-9480-49da-a869-e7dc86104a9f/content>.
16. Кузнецов О.Л., Таршин В.А., Шумейко И.С. Анализ času настройки корреляционного автокомпенсатора на подавление активной завады в условиях флуктуаций фронта волны. *Системи озброєння і військова техніка*. – 2007. – Вип. 3(11) – С. 114-115. http://nbuv.gov.ua/UJRN/sovit_2007_3_29.
17. Минервин М.М., Кузнецов О.Л., Шумейко И.С. Анализ влияния фазовых флуктуаций завады на эффективность работы автокомпенсаторов активных шумовых завад при использовании антенн с разными размерами. *Системи озброєння і військова техніка*. – 2006. – № 3(6) – С.36-38. <https://irbis-nbuv.gov.ua>.
18. Минервин Н.Н. Предельные размеры апертуры антенны радиолокационной станции при компенсации воздействия внешней помехи. *Прикладная радиоэлектроника*. – 2013. – Т. 12. – № 4. – С. 533-535. <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/d1b8e07b-9480-49da-a869-e7dc86104a9f/content>.
19. Минервин Н.Н., Гриб Д.А., Карлов Д.В. Сопоставление теоретических оценок и экспериментальных данных эффективности ослабления внешних помех корреляционными автокомпенсаторами. *Прикладная радиоэлектроника*. 2013. Т. 12, № 4. С. 536-537. <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/d1b8e07b-9480-49da-a869-e7dc86104a9f/content>.
20. Kuznietsov, O., Karlov, V., Kolomiitsev, O., Sadovyi, K., & Biesova, O. (2020). The influence of statistical characteristics of the fluctuations of the radiation signal initial phases on the accuracy of the measurement aerodynamic object radial velocity. *Advanced Information Systems*, 4(2), 123–129. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.18>.
21. Kuznietsov, O., Kolomiitsev, O., Kiyko, A., Kovalchuk, A., & Sadovyi, K. (2020). Analysis of possibilities of providing of necessary exactness of measuring of spatial coordinates of air objects in the radio-location station of accompaniment with phase aerial by a grate. *Advanced Information Systems*, 4(1), 91–96. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.13>.

Received (Надійшла) 11.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.10.2024

Possibilities of ensuring the specified failure protection of radio communication and radar systems in real conditions propagation of radio waves

O. Kuznietsov, V. Vasylyshyn, O. Kolomiitsev, Y. Bolbas

Abstract. Radio communication and radar systems operate under the influence of tropospheric inhomogeneities and the substratum, which is the cause of fluctuations in the phase front of electromagnetic waves. In particular, fluctuations of the interference wave front lead to a decrease in the immunity of these systems. The subject of study in the article is the effect of fluctuations of the phase front of an active masking interference wave on the effectiveness of its suppression in radio communication and radar systems. The goal is to evaluate the capabilities of radio communication and radar systems to ensure the specified immunity in real conditions of radio wave propagation. The task is to study the dependence of the effectiveness of suppression of active interference on the direction of its arrival at different sizes and differences of phase centers of antennas of communication and radar systems, as well as to determine a proposal for its improvement. In the course of solving the specified task, the perspective of using adaptive digital antenna arrays as antenna systems in radio communication and radar systems has been proven. Using the methods of mathematical statistics, the degree of influence of the fluctuations of the phase front of the active interference was estimated, depending on their statistical characteristics, which correspond to the real conditions of radio wave propagation. The dependence of the suppression coefficient of active interference on the degree of influence of phase fluctuations in the elements of the receiving aperture at fixed values of the deviations of the angle of arrival of the interference from the direction of the maximum of the side lobe of the antenna directional diagram was analyzed. The specified coefficient was evaluated based on the size and phase difference of the main and auxiliary antennas of the radio engineering system. The conditions for the best suppression of active interference in radio communication and radar systems have been determined. A promising direction of further research may be the application of the obtained results in relation to the issues of ensuring the given interference immunity of the specified systems under the influence of combined active-passive interference.

Keywords: adaptive digital antenna array, active masking interference, interference immunity, suppression coefficient, substratum, radio communication system, radar system, statistical characteristics, tropospheric inhomogeneities, phase center, phase front fluctuations.

Л. І. Леві, О. І. Євдоченко, О. О. Куш, О. С. Ястреба, С. І. Бабич

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО СИНТЕЗУ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Анотація. Найефективніше застосування мультисервісних мереж відбувається у традиційних операторів зв'язку, що значно розширює спектр послуг. Для корпоративного ринку консолідація всіх віддалених підрозділів в єдину мультисервісну мережу може значно підвищити ефективність обміну інформацією та забезпечити своєчасну доступність даних. Завдяки можливості обміну великими обсягами даних між офісами можна планувати конференц-дзвінки та відеоконференції з віддаленими підрозділами. Все це прискорює реагування на зміни в компанії та забезпечує своєчасне й оптимізоване управління всіма процесами. Мультисервісна мережа – це багатопольове середовище загального призначення, призначене для передачі голосу, зображень і даних за допомогою технології комутації пакетів. Воно характеризується характеристиками надійності телефонної мережі (порівняно з негарантованою якістю зв'язку в Інтернеті) і забезпечує низьку вартість передачі одиниці інформації (близьку до вартості передачі даних в Інтернеті). Основним завданням мультисервісних мереж є забезпечення роботи різномірних інформаційних і телекомунікаційних систем і додатків в єдиному середовищі передачі, де єдина інфраструктура використовується для передачі звичайного трафіку (даних) та іншого інформаційного трафіку (мовлення, відео тощо). Алгоритм проектування мультисервісних телекомунікаційних мереж (МСТМ) – це процес розробки системно-технічних рішень при їх побудові при короткостроковому, середньостроковому і перспективному розвитку. Оптимізація проектування МСТМ здійснюється на основі застосування принципів декомпозиції, системності та ітераційності проектування, а також методів послідовної оптимізації та ймовірнісної згортки при отриманні узагальнених критеріїв. Запропонований спосіб дозволяє перейти від рішення оптимізаційної задачі великої розмірності до взаємозалежної за вхідними та вихідними даними послідовності завдань меншої розмірності. В результаті забезпечується поетапний ітераційний синтез структури МСТМ і вибір значень внутрішніх параметрів шляхом параметричної оптимізації, при яких виконуються вимоги до якості функціонування і вартості проекту. При цьому розвинута теорія та методи структурного та параметричного синтезу мультисервісних телекомунікаційних накладених мереж на основі розробки нових моделей багаторівневих, багатопараметричних мереж і методів структурного і параметричного синтезу, які враховують наявність між рівнями накладених мереж фізичних і логічних зв'язків.

Ключові слова: мультисервісна мережа, параметрична та структурна декомпозиція, багатокритеріальний підхід, векторний критерій, послідовна оптимізація.

Вступ

Постановка проблеми. Телекомунікаційна мережа загального користування означає систему передачі, яка повністю або частково використовується для забезпечення передачі сигналів між визначеними кінцевими точками за допомогою телеграфних, радіо, оптичних або інших електромагнітних засобів, що означає телекомунікаційне обладнання та інші ресурси, залежно від обставин.

Телекомунікаційні послуги - це послуги, крім радіо- та телевізійного мовлення, надання яких повністю або частково складається з передачі та передачі сигналів по телекомунікаційних мережах.

Існує категорія, яка охоплює мережі підприємств, афілійованих з компаніями та установами, бізнес-інтереси яких виходять за межі телекомунікаційної галузі.

Оператор загальнодоступної телекомунікаційної інфраструктури, який називається оператором мережі, сприяє передачі сигналів між визначеними пунктами призначення в мережі за допомогою різних засобів, таких як телефон, мікрохвильовий, оптичний або електромагнітний методи. З іншого боку, провайдер мережевих послуг, будь то фізична чи юридична особа, бере участь у

пропонуванні послуг у сфері публічних телекомунікацій, що передусім передбачає передачу сигналів у мережі зв'язку.

Зв'язок охоплює будь-яку форму з'єднання, тимчасового чи постійного, яке забезпечує обмін інформацією між двома або більше користувачами системи передачі даних.

Телекомунікаційні послуги охоплюють передачу даних між мережею або користувачем і пунктом призначення. Ця передача передбачає обмін інформацією, необхідною для встановлення з'єднання та контролю за його просуванням, наприклад запит на утримання або ініціювання передачі.

Крім того, інформація про з'єднання, включаючи тривалість з'єднання, доступна як оператору мережі, так і постачальнику послуг мережі. Ці послуги, які дозволяють кінцевим користувачам та іншим операторам передавати трафік через свої мережі, називаються послугами транспортування інформації.

Основним завданням телекомунікаційних служб є забезпечення можливості обміну інформаційними повідомленнями між віддаленими об'єктами. При створенні мережі загального користування оператор зобов'язаний забезпечити стандартні інтерфейси (точки підключення) скрізь, де в мережі підключені кінцеві пристрої.

Існує категорія, яка охоплює мережі підприємств, афілійованих з компаніями та установами, бізнес-інтереси яких виходять за межі телекомунікаційної галузі.

Оператор загальнодоступної телекомунікаційної інфраструктури, який називається оператором мережі, сприяє передачі сигналів між визначеними пунктами призначення в мережі за допомогою різних засобів, таких як телефон, мікрохвильовий, оптичний або електромагнітний методи.

З іншого боку, провайдер мережевих послуг, будь то фізична чи юридична особа, бере участь у пропонуванні послуг у сфері публічних телекомунікацій, що передусім передбачає передачу сигналів у мережі зв'язку.

Зв'язок охоплює будь-яку форму з'єднання, тимчасового чи постійного, яке забезпечує обмін інформацією між двома або більше користувачами системи передачі даних.

Будемо вважати, що задано:

– призначення та основні варіанти застосування алгоритму проектування мультисервісної телекомунікаційної мережі (МСТМ) на основі багатокритеріального підходу;

– вимоги до характеристик мережі, засновані на використанні комплексних методів оцінки, які враховують кілька критеріїв;

– визначені критерії властивостей мережі;

– програмне забезпечення (конфігурація та функції).

Існує потреба в розробці алгоритму проектування МСТМ на основі багатокритеріального підходу.

При цьому вважається доцільним дотримуватись наступних обмежень: характеристики мережі доступу розраховуються на основі існуючого телекомунікаційного обладнання відомих виробників і відповідно до вимог технічної документації; терміни розробки та розрахунку проекту техніко-економічних показників визначається замовником [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

При проектуванні мереж зв'язку різного призначення формується відповідна оптимізаційна задача.

Для вирішення подібних задач доцільно застосувати наступні методи [3, 4].

1) Пошук компромісних ефективних рішень, оптимальних за певними компонентами векторно-го критерію за Парето.

2) Пошук рішень, оптимальних за глобальним скалярним критерієм, який отримано шляхом згортки певних компонент векторного критерію.

Параметрична та структурна декомпозиція МСТМ доцільна з урахуванням їх подальшого розвитку.

Вона передбачає послідовний ітераційний синтез структури та визначення внутрішніх параметрів шляхом параметричної оптимізації. При цьому враховуються вимоги до якості функціонування та вартості проекту.

Передбачається, що вимоги до якості функціонування формують систему обмежень на вихідні параметри мультисервісних телекомунікаційних мереж.

На практиці, як правило, оптимізаційна задача зводиться до знаходження мінімуму функціоналу техніко-експлуатаційних витрат. Розрахунок включає витрати, пов'язані з орендою каналів передачі, перераховану вартість мережевого обладнання та інвестиції, необхідні для відповідності встановленим або досяжним стандартам якості роботи.

Ця метрика встановлюється шляхом розгляду сумарної ймовірності задоволення вимог якості обслуговування для різних класів повідомлень, включаючи підсистеми керування, інформаційну безпеку та стабільність мультисервісних телекомунікаційних мереж.

Такий підхід підкреслює багатогранність поставленого завдання.

Одночасно врахування значень пропускної здатності для елементів мережі зв'язку, вибраних із заданого діапазону швидкостей цифрової системи передачі, включає фактор питомих витрат, пов'язаних з орендою каналів передачі. На ці витрати впливають довжина маршруту доставки інформації, тривалість роботи та діючі тарифні ставки.

Наявність важко формалізованих обмежень, багатокритеріальний характер завдання зумовлюють застосування ітераційного алгоритму проектування.

Виходячи з цього, пропонується метод проектування МСТМ, який складається з послідовності взаємопов'язаних етапів.

Останній етап охоплює всебічний аналіз викидів, пов'язаних із підтримкою якості послуг у МСТМ у зв'язку з самоподібною природою вузькосмугового та широкосмугового трафіку.

Цей етап включає в себе формулювання методики, яка містить конкретні заходи, адаптовані до умов самоподібного трафіку в компонентах МСТМ:

1) моделювання процесів формування самоподібного (мультисервісного) трафіку та його обслуговування при різних способах управління, включаючи пріоритетне обслуговування та резервування ресурсів;

2) розрахування показники якості роботи системи масового обслуговування (СМО) з застосуванням самоподібного трафіку та виконати уточнення обсягу накопичувача та визначити продуктивність вузла комутації з урахуванням впровадження рівнів якості обслуговування.

Формулювання мети статті. Мета розробки методики синтезу систем розглядуваного класу полягає в створенні алгоритму проектування МСТМ на основі багатокритеріального підходу.

Така методика повинна забезпечити високу ефективність прийняття управлінських рішень на телекомунікаційних мережах при їх побудові та модернізації.

Основна частина

Виходячи з попереднього аналізу, доцільно вважати, що реалізація процесу синтезу мультисервісних телекомунікаційних мереж відбувається наступним чином.

1) Вихідні дані. Вони складаються з технічного завдання (ТЗ), основного призначення МСТМ, конфігурації та категорій користувачів, номенклатури послуги та базової структури мережі, її підключення, а також застосування комунікаційних технологій і політики безпеки.

2) Формування політики інформаційної безпеки. Вони встановлюються на основі вимог, правил та обмежень що стосується здійснення інформаційної діяльності, спрямованої на досягнення та підтримання належного рівня інформаційної безпеки.

3). Розроблення системи критеріїв якості та відповідних вимог. Підготовка системи показників якості МСТМ, їх взаємозв'язку та вимог з урахуванням рекомендацій, складених на основі міжнародних стандартів МСЕ-Т, ISO 9000, TL 9000. Визначення робочих умов МСТМ та обмеження значень зовнішніх параметрів.

4) Формування унікальної структури МСТМ. Воно засноване на аналітичному описі МСТМ на основі теорії складних систем і теорії графів. Це формує початкову структуру МСТМ, яка розроблена на основі пошуку мережі мінімальної довжини. Припускається, що вона згодом розширюється для забезпечення вимог стабільності, або виділення структур існуючих комунікаційних мереж, які ми надаємо.

5) Розробка маршрутизації та розподіл потоків в МСТМ. Передбачає рішення задач статичної маршрутизації та розподілу потоків за пріоритетами повідомлень, які забезпечують пошук екстремуму для показників якості функціонування МСТМ.

6) Умови формування та обмеження зовнішніх параметрів. Вони визначають умови експлуатації та обмежують зовнішні параметри функціонування МСТМ.

7) Процес побудови математичних моделей для вузлів і мереж, який передбачає використання різноманітних математичних методів і принципів:

- розроблення аналітичних моделей для комутатійних вузлів, використовуючи теорію СМО, які охоплюють різні елементи, такі як прості потоки, фіксовані та експоненціальні довжини пакетів, очікування, втрати, відносні пріоритети та ненадійний сервісний пристрій;

- поставлена задача полягає у визначенні пріоритетів за класами якості послуг і категоріями користувачів, що включає управління трафіком, забезпечення інформаційної безпеки та інші підсистеми МСТМ.

- крім того, необхідно побудувати аналітичну модель комунікаційної мережі шляхом її декомпозиції на багатофазну СМО.

8) Аналіз ефективності функціональних процесів керування МСТМ:

- Визначення методів аналізу та критеріїв щодо правил прийняття рішень;

- Розрахунок показників якості відносно продуктивності для МСТМ, до яких відносяться середній час та ймовірність своєчасної доставки пакетів повідомлень, а також середня довжина черги.

- Визначення узагальненого показника ефективності функціонування (УПЕФ) за допомогою методу стохастичної згортки, тоді як середня мережева ймовірність того, що повідомлення різних класів у мережі доставляються своєчасно, служить УПЕФ. Вони визначаються типами наданих послуг та категоріями користувачів, а також інформаційною безпекою підсистем управління та МСТМ.

9) Оптимізація внутрішніх параметрів мультисервісної телекомунікаційної мережі. Оптимізація побудови МСТМ (функціонал вартості можна мінімізувати, дотримуючись підходу поетапного синтезу для визначення структури та вибору відповідних значень для внутрішніх параметрів, які задовольняють вимогам стабільності та якості обслуговування).

10) Аналіз стійкості мультисервісної телекомунікаційної мережі:

- оцінка елементної та конструктивної надійності, живучості та стійкості МСТМ передбачає розрахунок відповідних показників.

- управління властивістю стійкості мультисервісної телекомунікаційної мережі. При цьому у його структурі відбувається пошук елементів, які володіють характеристиками як низької стабільності, так і високої значущості. При цьому важливість визначається зв'язністю та обсягом уразливих елементів у мережі, а її ранжування – ступенем впливу на загальну стабільність мережі та реалізацією механізмів модифікації. Ці властивості змінюються залежно від структури та захисту елемента.

11) Перевірка відповідності умові стійкості (якщо «ні», то відбувається перехід до п. 12). Початкові значення вибраних внутрішніх параметрів використовуються для оцінки ефективності функціональності, перевірки вимог до якості та стабільності функціональності, а також вартості проекту. Якщо вимоги функціональної якості не виконуються, внутрішні параметри мультисервісної телекомунікаційної мережі оптимізуються.

12) Корекція структури мультисервісної телекомунікаційної мережі (перехід з п. 12 до п. 5, з п. 5 до п. 7, поки не буде отримано вірний результат). Якщо не вдається знайти значення внутрішніх параметрів обраної структури МСТМ, що відповідають вимогам якості проекту, стабільності роботи та вартості, структура мережі зв'язку модифікується. Якщо можливо, ТЗ буде виправлено.

13) Вибір методу керування параметрами МСТМ. Базується на проведенні більш детального дослідження питання забезпечення якості обслуго-

вування мультисервісної телекомунікаційної мережі в умовах самоподібності трафіку при використанні вузькосмугових та широкосмугових послуг.

14) Побудова математичної моделі процесу формування та підтримки мультисервісного трафіку. Моделюється процес формування самоподібного мультисервісного трафіку та його обслуговування за різних методів управління (пріоритетні послуги, резервування ресурсів).

15) Аналіз якості обслуговування в МСТМ. Розрахунок показників якості функціонування СМО з самоподібним трафіком.

16) Перевірка відповідності умові самоподібності трафіку (якщо «ні», то відбувається перехід до п. 13).

При виборі показників якості обслуговування ємність накопичувача та продуктивність вузлів комутації коригуються з урахуванням впровадження класів якості обслуговування. Якщо вимога самоподібності трафіку не виконується, необхідно перейти до розробки методу керування параметрами мультисервісної телекомунікаційної мережі.

17) Підготовка проекту мультисервісної телекомунікаційної мережі. Виконується розробка проектної документації мультисервісної телекомунікаційної мережі.

Висновки

Багатокритеріальний метод проектування мультисервісної телекомунікаційної мережі дозволяє вирішити наступні задачі.

1) На основі узагальнених показників, таких як умови самоподібності трафіку, дослідити ефективність процесу експлуатації мультисервісної телекомунікаційної мережі для різних цілей за різних умов використання.

2) Визначити ефективність процесів надання та інтеграції різних видів послуг з різними вимогами до якості послуг з урахуванням можливостей окремих підсистем управління та інформаційної безпеки.

3) Оптимізувати побудову мультисервісної телекомунікаційної мережі за критеріями забезпечення стійкості, мінімізації техніко-експлуатаційних витрат, забезпечити якість обслуговування з урахуванням введення визначеної класифікації якості обслуговування.

Загалом ці елементи визначають нові шляхи побудови композиційних структур мультисервісної телекомунікаційної мережі та організації зв'язків для окремих дослідницьких завдань. Це дає можливість приймати правильні управлінські рішення щодо синтезу даного класу мереж.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Toroshanko Ya. I. "Management reliability of telecommunication network on the analysis of sensitivity of the complex systems." *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii* 3 (2016): 31 – 36.
2. Мережі нового покоління для нової України. Інформаційний бюлетень Міжнародного центру перспективних досліджень // [Електронний ресурс], 2006. – Режим доступу: http://www.icps.com.ua/arh/pub/inform_technologies.html
3. <https://beginnersbook.com/2019/03/computer-network-topology-meshstar-bus-ring-and-hybrid/>
4. <https://www.geeksforgeeks.org/difference-between-simplex-half-duplexand-full-duplex-transmission-modes/>

Received (Надійшла) 23.08.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.11.2024

Application of the multi-criterial approach for the synthesis of multiservice telecommunication networks

L. Lievi, O. Yevdochenko, O. Kushch, O. Yastreba, S. Babych

Abstract. The most effective use of multi-service networks occurs with traditional communication operators, which significantly expands the range of services. For the corporate market, the consolidation of all remote divisions into a single multi-service network can significantly increase the efficiency of information exchange and ensure timely availability of data. With the ability to exchange large amounts of data between offices, you can schedule conference calls and video conferences with remote units. All this speeds up the response to changes in the company and ensures timely and optimized management of all processes. A multiservice network is a general-purpose, multi-purpose environment designed to transmit voice, images, and data using packet-switched technology. It is characterized by the reliability characteristics of the telephone network (compared to the unguaranteed quality of communication on the Internet) and provides a low cost of transmitting a unit of information (close to the cost of data transmission on the Internet). The main task of multi-service networks is to ensure the operation of heterogeneous information and telecommunication systems and applications in a single transmission environment, where a single infrastructure is used to transmit ordinary traffic (data) and other information traffic (broadcast, video, etc.). The design algorithm of multi-service telecommunication networks (MSTN) is a process of developing system and technical solutions during their construction with short-term, medium-term and long-term development. The optimization of MSTN design is carried out on the basis of the application of the principles of decomposition, systematic and iterative design, as well as methods of sequential optimization and probabilistic convolution when obtaining generalized criteria. The proposed method makes it possible to move from the solution of a large-dimensional optimization problem to a sequence of tasks that are interdependent in terms of input and output data. As a result, a step-by-step iterative synthesis of the MSTN structure and the selection of the values of the internal parameters by means of parametric optimization are provided, in which the requirements for the quality of functioning and the cost of the project are met. At the same time, the theory, and methods of structural and parametric synthesis of multi-service telecommunication overlay networks were developed based on the development of new models of multi-level, multilayer networks and methods of structural and parametric synthesis, which take into account the presence of physical and logical connections between layers of overlay networks.

Keywords: multi-service network, parametric and structural decomposition, multi-criteria approach, vector criterion, sequential optimization.

П. Є. Пустовойтов, М. Ю. Охрименко

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

МЕТОД АНАЛІЗУ ЯКОСТІ ЛОГІЧНИХ КАНАЛІВ ТА ВИБІР МАРШРУТІВ У ОДНОРАНГОВІЙ СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ

Анотація. Сенсорні мережі відіграють ключову роль у багатьох галузях завдяки своїй здатності ефективно збирати та передавати дані. Однак забезпечення надійності та якості передавання даних залишається однією з основних проблем. У статті представлено метод розрахунку якості каналів у сенсорній мережі, який базується на використанні апарату нечіткої математики, а саме операції транзитивного замикання нечіткого бінарного відношення. Запропонований метод використовує нечітке бінарне відношення для моделювання якості каналів зв'язку між вузлами мережі. Виконуючи транзитивне замикання, метод дозволяє отримати більш точну та адаптивну оцінку якості каналів, враховуючи різні фактори, такі як затримка, пропускна здатність, енергоспоживання та надійність. Результати досліджень показують, що використання операції транзитивного замикання нечіткого бінарного відношення дозволяє значно покращити точність оцінки якості каналів та підвищити ефективність вибору маршрутів у сенсорній мережі. Запропонований метод може бути корисним для покращення продуктивності та надійності сенсорних мереж, забезпечуючи їхню стійку та ефективну роботу у різних умовах експлуатації.

Ключові слова: логічний канал, оптимальний маршрут, однорангова сенсорна мережа.

Вступ

Логічний канал у сенсорній мережі (або мережі датчиків) являє собою концептуальний шлях, по якому дані передаються між вузлами мережі. Звичайно, це не обов'язково фізичний шлях, а швидше абстракція, яка допомагає організувати передачу даних. Логічні канали використовують для визначення шляху, яким дані повинні передаватися від сенсора до базової станції або іншого кінцевого пункту [1].

Створення захищених каналів [2] для передачі чутливих даних дозволяє забезпечити конфіденційність, цілісність та автентичність інформації в сенсорних мережах, захищаючи її від несанкціонованого доступу, перехоплення та модифікації, що є критично важливим для підтримки безпеки і надійності в різних застосуваннях, таких як моніторинг навколишнього середовища, медичні системи або військові операції.

В сенсорних мережах можуть існувати різні типи логічних каналів [3], наприклад: уніфіковані канали (використовуються для передачі даних від кожного вузла до центрального вузла або базової станції), групові канали (призначені для передачі даних між вузлами, які знаходяться в межах однієї підмережі або кластера), динамічні канали (формуються та змінюються в залежності від поточної мережевої топології та вимог до передачі даних). Логічні канали допомагають оптимізувати роботу сенсорної мережі, забезпечуючи надійність, ефективність та безпеку передачі даних.

Актуальність дослідження. Мета роботи. Однорангові сенсорні мережі складаються з великої кількості взаємопов'язаних сенсорів, які обмінюються даними про навколишнє середовище. Надійність і ефективність цих мереж залежать від якості логічних каналів та оптимального вибору маршрутів для передачі даних.

Метод аналізу якості логічних каналів та вибір маршруту у одноранговій сенсорній мережі є **актуальним** через зростаючу потребу в ефективному управлінні сенсорними мережами, які використовуються в різних галузях, таких як охорона здоров'я,

промисловість, сільське господарство та розумні міста. Здатність надійно збирати та передавати дані в реальному часі є критичною для підтримки безперервної роботи цих систем. Відповідний метод аналізу якості логічних каналів допомагає забезпечити стабільність і надійність зв'язку між сенсорами, що є необхідним для прийняття обґрунтованих рішень на основі зібраних даних.

Окрім того, метод вибору маршруту у одноранговій сенсорній мережі сприяє підвищенню загальної надійності та безпеки системи. Врахування якості логічних каналів дозволяє запобігати можливим збоєм зв'язку та забезпечувати безперервність передачі даних навіть у випадку виходу з ладу окремих вузлів. Це особливо важливо для застосувань, де безпека та надійність даних мають критичне значення, таких як моніторинг здоров'я пацієнтів або контроль промислових процесів. Відповідний підхід до вибору маршруту підвищує стійкість мережі до збоїв та забезпечує стабільну роботу в різних умовах експлуатації.

Метою даного дослідження є розробка методу аналізу якості логічних каналів і вибору оптимальних маршрутів у одноранговій сенсорній мережі для забезпечення надійності зв'язку, мінімізації енергоспоживання та підвищення загальної ефективності мережі.

Для досягнення поставленої мети треба вирішити такі задачі:

- провести огляд існуючих методів аналізу якості логічних каналів і маршрутизації в однорангових сенсорних мережах;

- визначити ключові фактори, що впливають на якість логічних каналів та вибір маршрутів, такі як енергоспоживання, пропускна здатність, затримки передачі та надійність;

- розробити метод для оцінки якості логічних каналів, враховуючи параметри, що впливають на продуктивність мережі;

- створити алгоритм вибору маршрутів, що забезпечує баланс між метриками якості передачі даних;

- реалізувати запропонований метод та алгоритм у програмному середовищі;

- провести моделювання роботи однорангової сенсорної мережі з використанням розробленого методу;
- розробити рекомендації щодо впровадження розробленого методу у реальні сенсорні мережі.

1. Огляд літератури

Сенсорні мережі складаються з численних невеликих сенсорів, які взаємодіють для збору і передачі даних про навколишнє середовище. Ці сенсори можуть вимірювати різні параметри, такі як температура, вологість, тиск, рух та інші фізичні явища. Сенсорні мережі застосовуються у багатьох сферах, включаючи охорону здоров'я, промисловість, сільське господарство, екологічний моніторинг та розумні міста. Вони дозволяють здійснювати постійний моніторинг і аналіз даних, що сприяє прийняттю більш обґрунтованих рішень та підвищенню ефективності процесів. Тому для управління такими мережами, визначення логічних каналів та маршрутизації використовують різні методи.

В роботах [4, 5] приділяється увага мережевим протоколам на основі кластеризації, які мають такі переваги, як зниження енергоспоживання (вузли передають дані лише до центру кластера, що зменшує кількість передач на великі відстані) та покращену масштабованість (Велика мережа розбивається на кластери, що дозволяє краще масштабуватися при збільшенні кількості вузлів).

Але існує висока залежність від кластерних центрів. Якщо кластерний центр виходить з ладу, це може вплинути на всю підмережу. У свою чергу нерівномірне споживання енергії, через те, що кластерні центри споживають більше енергії, ніж інші вузли, приводить до швидкого розрядження їх батарей.

В роботах [5, 6] розглядаються методи маршрутизації на основі позиційної інформації. Вони розраховують маршрути за рахунок використання географічних даних, що дозволяє знаходити найкоротші та найефективніші шляхи для передачі даних. Методи вибирають найближчі вузли як проміжні вузли, що зменшує затримки в передачі даних. Але, у свою чергу, у великих мережах складно підтримувати актуальну позиційну інформацію для всіх вузлів, що ускладнює масштабованість. Для роботи методів ставиться вимога наявності GPS або інших засобів визначення положення координат, але не всі вузли можуть бути обладнані таким приладом.

В роботах [7, 8] пропонуються методи маршрутизації у сенсорних мережах на основі енергетичних ресурсів. Методи враховують рівень заряду батарей вузлів, що дозволяє ефективніше використовувати ресурси мережі. У свою чергу, збалансоване використання енергії між вузлами продовжує загальний термін служби мереж. Але врахування енергетичних ресурсів кожного вузла вимагає складних алгоритмів та обчислень, потрібно постійно контролювати енергетичний стан кожного вузла, що ускладнює управління у великих мережах.

Методи на основі ієрархічної маршрутизації, які розглядаються у [9], припускають, що ієрархічна структура дозволяє ефективніше організувати

передачу даних, а навантаження на вузли зменшується за рахунок того, що вузли з нижчого рівня передають дані лише до вузлів вищого рівня, що знижує навантаження. Проте, ієрархічна структура потребує складного управління та налаштування, а вихід з ладу вузлів вищого рівня може значно вплинути на роботу мережі.

Протоколи на основі мультишляхової маршрутизації, розглянуті у [9] базуються на очевидному твердженні, що наявність кількох альтернативних шляхів дозволяє забезпечити безперервність передачі даних у разі виходу одного з вузлів з ладу, і, у свою чергу, розподіл трафіку між різними шляхами допомагає уникнути перевантаження окремих вузлів. Але, знов таки, це вимагає підвищене енергоспоживання, тому що підтримка кількох маршрутів може вимагати більше енергії. Також, вибір оптимальних шляхів та підтримка актуальних маршрутів може бути складним завданням з точки зору зберігання бази маршрутів та управління мережею.

Кожен метод має свої особливості і може бути обраний залежно від специфічних вимог та умов роботи сенсорної мережі.

2. Постановка задачі

Розглянемо модель сенсорної мережі (рис. 1), створену в середовищі OMNeT++. Цей приклад являє собою візуальне представлення архітектури мережі. Візуалізація в OMNeT++ допомагає зрозуміти складні взаємодії між елементами мережі.

Будівництво тимчасових логічних каналів у сенсорній мережі за певними метриками дозволяє оптимізувати передачу даних і забезпечити надійність зв'язку. Це особливо важливо в динамічних середовищах, де умови можуть швидко змінюватися, наприклад, через зміну фізичного розташування сенсорів або зміну умов навколишнього середовища. Вибір оптимальних логічних каналів на основі таких метрик, як енергоспоживання, пропускна здатність, затримка передачі та надійність, дозволяє адаптувати мережу до поточних умов і забезпечити ефективну передачу даних.

Тимчасові логічні канали також сприяють збалансованому використанню ресурсів мережі, запобігаючи перевантаженню окремих вузлів та подовжуючи час роботи всієї системи. Вони дозволяють розподіляти навантаження між різними сенсорами, враховуючи їхні поточні ресурси та стан. Це допомагає зменшити ризик виходу з ладу критично важливих вузлів і забезпечити стійкість мережі до збоїв. Таким чином, створення тимчасових логічних каналів на основі відповідних метрик підвищує загальну ефективність і надійність сенсорної мережі, що є важливим для її успішного функціонування у різних застосуваннях.

Таким чином, ставиться задача розробки методу аналізу якості та створення тимчасових логічних каналів у сенсорній мережі на основі певних метрик, що дозволить оптимізувати передачу даних і забезпечити надійність зв'язку. Врахування метрик, таких як пропускна здатність, затримка передачі та надійність, дозволяє адаптувати мережу до змінних умов навколишнього середовища і фізичного розташування сенсорів.

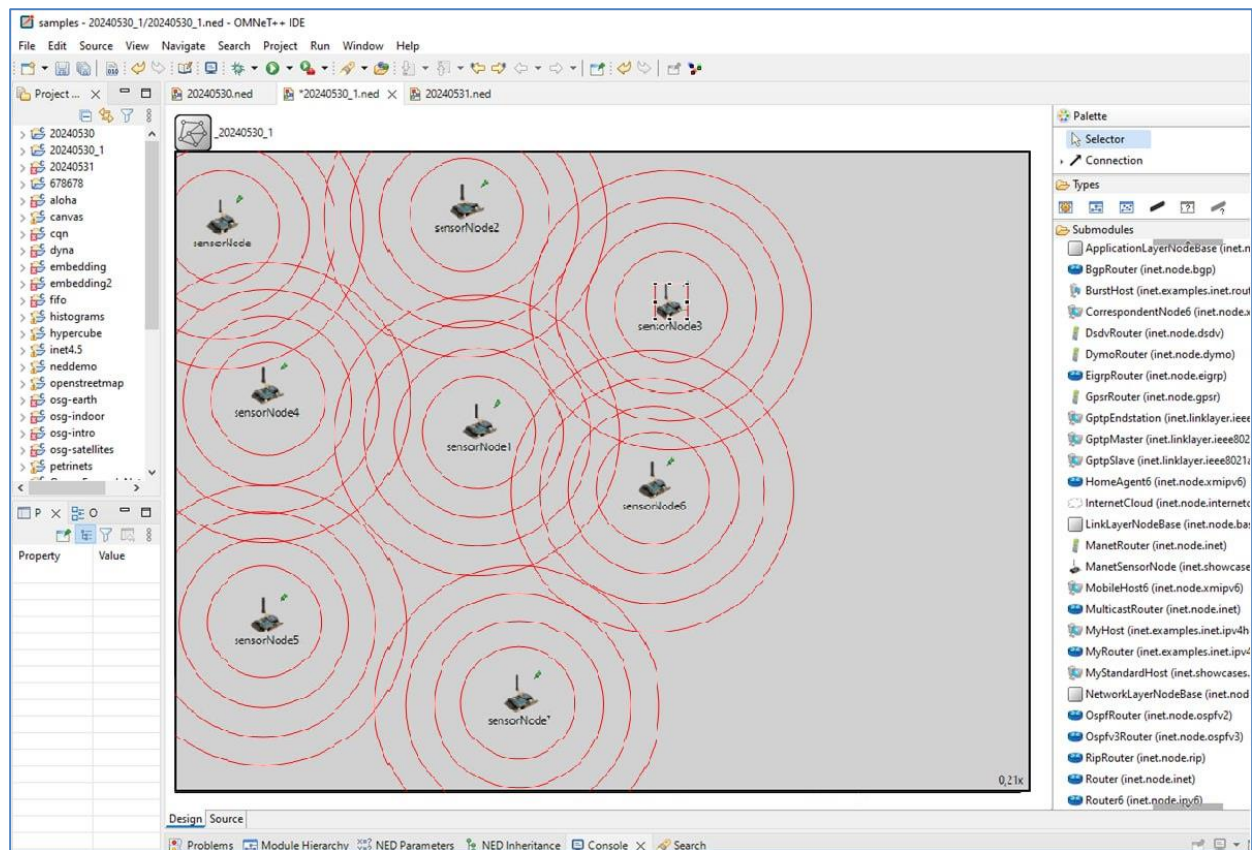


Рис. 1. Екранна форма моделі мережі у OMNeT++

Рішення цієї задачі сприятиме збалансованому використанню ресурсів мережі, запобіганню перевантаженню окремих вузлів і подовженню часу роботи всієї системи. Це дозволить ефективно розподіляти навантаження між сенсорами, зменшуючи ризик виходу з ладу критично важливих вузлів і підвищуючи стійкість мережі до збоїв. Отже, розробка методу аналізу якості та створення тимчасових логічних каналів на основі відповідних метрик є ключовою для підвищення загальної ефективності та надійності сенсорної мережі.

3. Основні результати

Сенсорну мережу, модель якої наведена на рис. 1, було представлено у вигляді графа, де кожен вузол сенсорної мережі та зв'язки між ними інтерпретовані, як вершини та ребра графа відповідно. Кожен сенсорний вузол (сенсор) у мережі представлено вершиною графа, які позначено v_i , $i = 1..8$. У свою чергу, зв'язки між сенсорами представлено ребрами графа, якщо сенсори можуть обмінюватися даними безпосередньо один з одним. Тобто, якщо сенсорний вузол v_i має змогу безпосередньо передавати дані сенсорному вузлу v_j , то між v_i та v_j проводилось ребро. У відповідність кожному ребру ставилась вага (значення якості логічного каналу між вузлами) - дійсне число з інтервалу $[0..1]$.

Такий граф $G(V, E, \mu)$ представлено у вигляді матриці M_Q , табл.1, Де, V - множина вершин графа, E – множина дуг графа, $\mu_Q(< v_i, v_j >)$ – функція якості каналу, що залежить від пари вузлів v_i, v_j , які

поеднує канал. Якщо вузли не пов'язані один з одним безпосередньо, то у матриці M_Q ставиться нуль на перехресті відповідного стовпця та строки.

Таблиця 1 – Матриця M_Q безпосередніх зв'язків вузлів та якості каналів

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8
v_1	1	0,75	0,32	0,47	0,53	0,68	0,71	0,83
v_2	0,75	1	0,11	0,73	0,89	0,51	0,49	0,42
v_3	0,32	0,11	1	0,29	0,87	0,37	0,34	0,92
v_4	0,47	0,73	0,29	1	0,17	0,23	0,59	0,67
v_5	0,53	0,89	0,87	0,17	1	0,86	0,36	0,24
v_6	0,68	0,51	0,37	0,23	0,86	1	0,75	0,79
v_7	0,71	0,49	0,34	0,59	0,36	0,75	1	0,81
v_8	0,83	0,42	0,92	0,67	0,24	0,79	0,81	1

Використовуючи математичний апарат теорії нечіткої математики для опису відношень між усіма парами вузлів мережі, маємо бінарне нечітке відношення $Q = \{< v_i, v_j >, \mu_Q(< v_i, v_j >)\}$.

Оберемо пару вузлів мережі, наприклад, v_i та v_j , побудуємо множину всіх можливих шляхів, які починаються у вузлі v_i та закінчуються у вузлі v_j і проходять через всі інші вузли сенсорної мережі. Для кожного такого шляху ($< v_i, v_{n_1} >, < v_{n_1}, v_{n_2} >, \dots, < v_{n_{m-2}}, v_j >$) розраховується його метрика як

$$L_t^{[i,j]}(v_i, v_j) = \min\{\mu_Q(< v_i, v_{n_1} >), \mu_Q(< v_{n_1}, v_{n_2} >), \dots, \mu_Q(< v_{n_{m-2}}, v_j >)\}, \quad (1)$$

де t – номер можливого маршруту від вузла v_i до вузла v_j , $n_1, n_2 \dots n_z$ – деякі проміжні вузли маршруту, $z \leq m - 2$ (маршрут не обов'язково повинен охоплювати всі вузли мережі), m – кількість вузлів у мережі.

Тепер, серед множини t можливих маршрутів від вузла v_i до вузла v_j відшукується такий, для якого значення метрики $L_t^{[i,j]}(v_i, v_j)$ буде максимальним. Тоді для пари вузлів $\langle v_i, v_j \rangle$ значення функції належності нечіткого відношення $R(\langle v_i, v_j \rangle, \mu_R(\langle v_i, v_j \rangle))$ розраховується як

$$\mu_R(\langle v_i, v_j \rangle) = \max_t L_t^{[i,j]}(v_i, v_j). \quad (2)$$

Повторюючи таку процедуру для всіх пар вузлів v_i та v_j , отримуємо сукупність значень функції належності $\mu_R(\langle v_i, v_j \rangle)$ результуючого нечіткого відношення $R(\langle v_i, v_j \rangle, \mu_R(\langle v_i, v_j \rangle))$, яке являє собою

$$\mu_{Q \otimes Q}(\langle v_i, v_j \rangle) = \max_{v_z} \{ \min\{\mu_Q(\langle v_i, v_z \rangle), \mu_Q(\langle v_z, v_j \rangle)\} \}, \quad z \neq i, z \neq j, \quad (3)$$

та визначає величину належності елемента $\langle v_i, v_j \rangle$ до бінарного відношення $Q \otimes Q$ з матрицею належності $\mu_{Q \otimes Q}$.

Таким чином, відповідно до (3) фінальне значення метрики якості шляху між будь-якими вузлами мережі визначається серед найкращих маршрутів серед сукупностей $1 \dots m - 1$ ланцюгових маршрутів. При чому, треба мати на увазі, що, якщо на деякому етапі, наприклад на $k + 1$ кроці при обчисленні матриці M_Q^{k+1} з'ясується, що $M_Q^{k+1} = M_Q^k$, то зрозуміло, що $i M_Q^k = M_Q^{k+1} = M_Q^{k+2} \dots M_Q^{m-1}$. Тому, у такому випадку обчислення можна припинити на k кроці.

Розрахуємо відношення $R^{(2)}$ із матрицею належності $M_R^{(2)} = M_Q \vee M_Q^2$, для випадку, коли відшукуються найкращі шляхи з точки зору показника метрики якості, які складаються виключно із одно- та дволанцюгових маршрутів (табл. 2). Тут кольором відмічено дволанцюгові маршрути, які покращили метрику якості у порівнянні із одностанцюговими, що мають ті ж вузли відправки та призначення.

Таблиця 2 – Матриця $M_R^{(2)}$ метрики якості одностанцюгових маршрутів

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8
v_1	1	0,75	0,83	0,73	0,75	0,79	0,81	0,83
v_2	0,75	1	0,87	0,73	0,89	0,86	0,71	0,75
v_3	0,83	0,87	1	0,67	0,87	0,86	0,81	0,92
v_4	0,73	0,73	0,67	1	0,73	0,67	0,67	0,67
v_5	0,75	0,89	0,87	0,73	1	0,86	0,75	0,87
v_6	0,79	0,86	0,86	0,67	0,86	1	0,79	0,79
v_7	0,81	0,71	0,81	0,67	0,75	0,79	1	0,81
v_8	0,83	0,75	0,92	0,67	0,87	0,79	0,81	1

Далі, використовуючи (3) та (4), розрахуємо тепер відношення $R^{(3)}$ із матрицею належності

$$M_R^{(3)} = M_Q \vee M_Q^2 \vee M_Q^3, \quad (6)$$

транзитивне бінарне замикання нечіткого бінарного відношення Q (табл.1) із матрицею належності M_Q .

Практичне виконання операції транзитивного замикання R бінарного нечіткого відношення Q реалізується шляхом об'єднання матриць M_Q із

$$M_R = M_Q \vee M_Q^2 \vee M_Q^3 \vee \dots \vee M_Q^k, \quad (3)$$

де M_Q^k – представляє собою k - ступень матриці M_Q бінарного нечіткого відношення Q , $k < m - 2$, m – кількість вузлів мережі. У свою чергу, k -а ступень матриці бінарного нечіткого відношення обчислюється рекурентно із співвідношення

$$M_Q^k = M_Q \otimes M_Q^{k-1}, \quad k > 1, \quad (4)$$

де знак \otimes – операція композиції матриць належності двох бінарних відношень. Наприклад, композиція $M_{Q \otimes Q}$ двох матриць M_Q задається формулою

для випадку, коли відшукуються найкращі шляхи з точки зору показника метрики якості серед 1..3 ланцюгових маршрутів (табл. 3). Тут, аналогічно, кольором виділені триланцюгові маршрути, які покращили метрику, отримані на попередній ітерації.

Таблиця 3 – Матриця $M_R^{(3)}$ метрики якості 1..3 ланцюгових маршрутів

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8
v_1	1	0,75	0,83	0,73	0,83	0,79	0,81	0,83
v_2	0,75	1	0,87	0,73	0,89	0,86	0,75	0,87
v_3	0,83	0,87	1	0,73	0,87	0,86	0,81	0,92
v_4	0,73	0,73	0,73	1	0,73	0,73	0,71	0,73
v_5	0,83	0,89	0,87	0,73	1	0,86	0,81	0,87
v_6	0,79	0,86	0,86	0,73	0,86	1	0,79	0,86
v_7	0,81	0,75	0,81	0,71	0,81	0,79	1	0,81
v_8	0,83	0,87	0,92	0,73	0,87	0,86	0,81	1

На четвертому кроці розраховується матриця $M_R^{(4)}$, яка представлена у таблиці 4. У свою чергу, розрахунок матриці $M_R^{(5)}$ не дав будь-яких покращень метрики якості, тому подальші розрахунки можна не продовжувати і зупинитись на матриці $M_R^{(4)}$,

Таблиця 4 – Матриця $M_R^{(4)}$ метрики якості 1..4 ланцюгових маршрутів

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8
v_1	1	0,83	0,83	0,73	0,83	0,83	0,81	0,83
v_2	0,83	1	0,87	0,73	0,89	0,86	0,81	0,87
v_3	0,83	0,87	1	0,73	0,87	0,86	0,81	0,92
v_4	0,73	0,73	0,73	1	0,73	0,73	0,73	0,73
v_5	0,83	0,89	0,87	0,73	1	0,86	0,81	0,87
v_6	0,83	0,86	0,86	0,73	0,86	1	0,81	0,86
v_7	0,81	0,81	0,81	0,73	0,81	0,81	1	0,81
v_8	0,83	0,87	0,92	0,73	0,87	0,86	0,81	1

4. Обговорення результатів

У табл. 5 наведено матрицю послідовності маршрутів, яка відображає знайдені шляхи передачі даних у вихідній сенсорній мережі. Кожна клітинка цієї

матриці відповідає конкретному маршруту, що складається з кількох послідовних вузлів мережі. Визначення якості маршруту базується на показниках метрики, яку задає адміністратор мережі.

Таблиця 5 – Матриця послідовності вузлів для 1..4 ланцюгових маршрутів

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8
v_1		1-8-3-5-2	1-8-3	1-2-4	1-8-3-5	1-8-3-5-6	1-8-7	1-8
v_2	2-5-3-8-1		2-5-3	2-4	2-5	2-5-6	2-5-3-8-7	2-5-3-8
v_3	3-8-1	3-5-2		3-5-2-4	3-5	3-5-6	3-8-7	3-8
v_4	4-2-1	4-2	4-2-5-3		4-2-5	4-3-5-6	4-2-1-8-7; 4-2-5-6-7	4-2-1-8
v_5	5-3-8-1	5-2	5-3	5-2-4		5-6	5-3-8-7	5-3-8
v_6	6-5-3-8-1	6-5-2	6-5-3	6-5-2-4	6-5		6-5-3-8-7	6-5-3-8
v_7	7-8-1	7-8-3-5-2	7-8-3	7-6-5-2-4; 7-8-1-2-4	7-8-3-5	7-8-3-5-6		7-8
v_8	8-1	8-3-5-2	8-3	8-1-2-4	8-3-5	8-3-5-6	8-7	

Матриця (табл. 5) дозволяє порівнювати різні маршрути між собою (якщо їх декілька) та обирати найбільш оптимальні з них за допомогою додаткових метрик для забезпечення ефективної та надійної передачі даних. Показано приклади, коли більш багатоланцюговий маршрут (той, що має більше проміжних вузлів) може бути кращим за менш ланцюговий. Це може статися через різні причини, наприклад, кращу якість зв'язку або меншу завантаженість окремих сегментів багатоланцюгового маршруту. Такі маршрути можуть мати переваги у стабільності та надійності передачі даних, оскільки кожен проміжний вузол може виконувати функції ретранслятора та корекції помилок, забезпечуючи більш стійкий зв'язок. Вибір багатоланцюгового маршруту може також знизити навантаження на окремі вузли мережі, розподіляючи трафік рівномірніше і таким чином подовжуючи загальний термін служби сенсорної мережі.

Висновки

Розробка методу аналізу якості логічних каналів та вибору маршрутів у одноранговій сенсорній мережі дозволило покращити параметри якості роботи мережі, серед них: надійність передачі даних, пропускання здатність та загальна ефективність функціонування мережі. Це сприятиме підвищенню продуктивності та тривалості роботи сенсорних мереж.

На практиці використання такого методу можливо у управляючих вузлах кластерів для покращення метрик функціонування саме кластера. Рекомендації стосовно частоти виконання наведених розрахунків залежать від багатьох показників сенсорної мережі, таких як динаміка вузлів, швидкість руху, зміна навантаження та т.п. Такі рекомендації потребують подальшого дослідження, результати якого будуть опубліковані у майбутньому.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Pustovoitov, P., Voronets, V., Voronets, O., Sokol, H., Okhrymenko, M. Assessment of QoS indicators of a network with UDP and TCP traffic under a node peak load mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2024. V. 1. № 4(127). P. 23-31.
2. Pavlo Pustovoitov, Maxim Okhrymenko, Vitalii Voronets, Dmitry Udalov. The speed calculating increasing method of the Markov model network. *Advanced Information Systems (Сучасні інформаційні системи)*. 2021. Vol. 5, No. 3. P. 13-17.
3. A.M. Kapiton, R.V. Baranenko, H.V. Sokol, M.Yu. Okhrymenko. Adaptive combined channel network coding for cognitive radio networks with cooperative relay. *Electronic Modeling*. 2024. V. 46. № 1, с. 78—89
4. Meroth A., Sora P. *Sensor networks in theory and practice*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023
5. *Handbook of Sensor Networks* / ed. by I. Stojmenović. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2005
6. Obaidat M. S., Misra S. *Principles of Wireless Sensor Networks*. Cambridge University Press, 2014.
7. Azim M. M. A., Xiaohong J. *Wireless Sensor Multimedia Networks*. Taylor & Francis Group, 2020.
8. Vuran M. C., Akyildiz I. F. *Wireless Sensor Networks*. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2010. 520 p.
9. *Wireless Sensor Networks* / S. Chai et al. Singapore : Springer Singapore, 2020

Received (Надійшла) 29.08.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.10.2024

Method for analyzing the quality of logical channels and choosing routes in a single-rank sensor network

Pavlo Pustovoitov, Maksym Okhrymenko

Abstract. Sensor networks play a key role in many industries due to their ability to effectively collect and transmit data. However, ensuring the reliability and quality of data transmission remains one of the main problems. The article presents a method for calculating the quality of channels in a sensor network, which is based on the use of fuzzy mathematics, namely the operation of transitive closure of a fuzzy binary relation. The proposed method uses a fuzzy binary relation to model the quality of communication channels between network nodes. By performing transitive closure, the method allows to obtain a more accurate and adaptive assessment of channel quality, taking into account various factors such as delay, bandwidth, energy consumption and reliability. The research results show that the use of the transitive closure operation of a fuzzy binary relation can significantly improve the accuracy of channel quality assessment and increase the efficiency of route selection in a sensor network. The proposed method can be useful for improving the productivity and reliability of sensor networks, ensuring their stable and efficient operation under various operating conditions.

Keywords: logical channel, optimal route, peer-to-peer sensor network.

Г. В. Худов, І. Ю. Грідасов, І. А. Хижняк, І. Ю. Юзова, Т. М. Калімулін, Ю. С. Соломоненко, Р. Ю. Райков
Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна

АНАЛІЗ ТАКТИКО-ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ТАКТИКИ ЗАСТОСУВАННЯ ОСНОВНИХ ЗАСОБІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ (БЛИЖНЬОЇ ДІЇ) РОСІЙСЬКОЇ ФЕДЕРАЦІЇ

Анотація. Предметом вивчення в статті є тактико-технічні характеристики та тактика застосування основних засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) ближньої дії (окопний РЕБ), які застосовують збройні сили російської федерації (рф) в російсько-українській війні. **Метою** є аналіз тактико-технічних характеристик основних засобів РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ) та їх тактики застосування. **Завдання:** ідентифікація та класифікація засобів РЕБ збройних сил рф, аналіз основних технічних параметрів засобів РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ), дослідження стратегій застосування засобів РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ) у бойових діях. Використовуваними **методами** є: порівняльний аналіз, методи кластеризації даних, аналітичні та емпіричні методи аналізу застосування засобів РЕБ у російсько-українській війні. Отримані такі **результати.** Проведений структурований аналіз тактико-технічних характеристик та тактики застосування засобів РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ) збройних сил рф, наведені їх переваги та недоліки, сформувані пропозиції щодо шляхів подальших досліджень. Практична значимість отриманих результатів в майбутньому може стати основою для удосконалення існуючих ударних FPV-дронів, які застосовуються Збройними Силами України, а саме: обґрунтування шляхів протидії у разі подавлення їх каналу управління засобами РЕБ. **Висновки.** Аналіз тактико-технічних характеристик та тактики застосування засобів РЕБ рф ближньої дії (окопний РЕБ) показав, що засоби РЕБ такого типу є одним із дієвих інструментів протидії ударним FPV-дроном, які в свою чергу суттєво впливають на хід сучасних військових операцій. З початком широкомасштабного вторгнення збройних сил рф на територію України, засоби РЕБ, які були проаналізовані в роботі постійно удосконалювалися з точки зору їх параметрів та тактики застосування в бойових умовах. Також суттєво були збільшені кількісні показники їх виробництва рф, розроблена значна кількість нових комплексів. Слід констатувати, що засоби РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ) становлять суттєву загрозу в сучасних умовах ведення бойових дій. Показовим чинником актуальності даного напрямку досліджень є той факт, що збройні сили рф з великою інтенсивністю удосконалюють засоби РЕБ, з метою відповідності їх параметрів та тактики застосування сучасним умовам сьогодення в військових операціях. Отже, на теперішній час Збройні Сили України мають виклики щодо протидії засобам РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ), водночас жодна країна світу не мала такого досвіду протидії, тому отриманні наукові результати в майбутньому можуть стати підґрунтям для розробки шляхів вирішення даного проблемного питання.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, FPV-дрон, окопний РЕБ, радіоелектронна боротьба, тактико-технічні характеристики, тактика застосування.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Аналіз сучасних військових конфліктів у двадцять першому столітті, як локальних так і глобальних, показав, що протистояння сторін все більше переходить у площину радіоелектронного протистояння, де вирішальну роль відіграють засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ) [1]. РЕБ – це комплекс скоординованих дій підрозділів Збройних Сил (ЗС), спрямованих на отримання інформації про місцезнаходження радіоелектронних засобів (РЕЗ), систем управління військами та озброєнням противника, а також їхнє знищення, виведення з ладу або захоплення шляхом радіоелектронного подавлення. Водночас РЕБ включає заходи щодо захисту власних РЕЗ, систем управління від впливу радіоелектронної розвідки противника та контррадіоелектронної протидії [2].

РЕБ передбачає використання радіо та електромагнітних сигналів для захисту або порушення роботи комунікацій та обладнання. Структурно РЕБ складається з трьох основних напрямів: радіоелектронна атака, радіоелектронний захист та радіоелектронна підтримка. Радіоелектронна атака спрямована на ураження радарів, комунікаційних і навігаційних систем противника за допомогою радіохвиль для подавлення, з метою зниження їхньої ефективності або повного виведення з ладу. На противагу цьому,

радіоелектронний захист зосереджений на захисті від зазначених спроб подавлення противником, забезпечуючи функціонування комунікацій та систем навіть в умовах завад. Радіоелектронна підтримка включає в себе виявлення та локалізацію електромагнітних випромінювань, що в свою чергу, на практиці призводить до неузгодженості з радіоелектронною розвідкою, оскільки обидва напрями пов'язані з перехопленням використання електромагнітного спектру противником. Слід зазначити, що різниця між радіоелектронною підтримкою та радіоелектронною розвідкою є суттєвою, яка визначається метою, масштабом та контролюючою стороною військової операції. Наприклад, у Сполучених Штатах Америки (США) радіоелектронна підтримка здебільшого обслуговує тактичні потреби командирів підрозділів в районах ведення бойових дій, проте, як радіоелектронна розвідка виконує функцію збору розвідувальних даних, на стратегічному рівні, підпорядковану окремим міністерствам [1].

У процесі сучасних бойових дій, зокрема враховуючи досвід російсько-української війни, спостерігається значне розширення номенклатури засобів РЕБ, які можуть бути застосовані як на стратегічному, так і на тактичному рівнях. Одним із основних компонентів засобів РЕБ збройних сил російської федерації (рф) є комплекси для радіоелектронного подавлення, радіоелектронної розвідки та

системи для захисту власних комунікаційних та розвідувальних мереж від впливу противника. Важливим є те, що використання цих систем дозволяє рф не лише обмежувати можливості українських сил безпеки і оборони у маневрах та координації дій, але й дезорієнтувати їх у плануванні операцій [3].

Необхідно врахувати той факт, що досвід російсько-української війни значно вплинув на концепцію тактики застосування військ у сучасних світових війнах. Це в свою чергу пов'язано з великою інтенсивністю застосування безпілотних літальних апаратів (БпЛА) різних типів, а саме ударних FPV-дронів. Слід констатувати, що в протипагу зазначеному, збройні сили рф системно застосовують на всіх рівнях засоби РЕБ.

Таким чином, виникає актуальна задача дослідження тактико-технічних характеристик (ТТХ) засобів РЕБ збройних сил рф та їх тактики застосування в бойових умовах, як на тактичному, так і на оперативному рівнях. В рамках даної публікації автори обмежуються аналізом засобів РЕБ та їх тактики застосування на тактичному рівні, які є основним протидіючим фактором в боротьбі із ударними FPV-дронами.

Даний напрям досліджень є актуальним у контексті російсько-української війни, оскільки отримані результати можуть стати підґрунтям, що дозволить в майбутньому удосконалити тактику застосування підрозділів. А використання FPV-дронів може, в свою чергу, зміцнити здатність ЗС України ефективно протистояти в умовах інтенсивного радіоелектронного подавлення засобів озброєння і військової техніки (ОВТ).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У зв'язку з широкомасштабним застосуванням ЗС України ударних FPV-дронів для досягнення переваги на полі бою, виникає нагальна потреба аналізу ТТХ та тактики застосування засобів РЕБ збройними силами рф. Це в свою чергу обумовлено потребою постійного удосконалення можливостей ударних FPV-дронів в умовах бойових дій та протидії засобам РЕБ противника. Відповідно, у даному дослідженні автори фокусуються на вивченні різних аспектів застосування засобів РЕБ на тактичному рівні в рамках військових операцій. На теперішній час, тематиці досліджень присвячено значний ряд робіт. Детальному аналізу підлягали роботи [4–9].

Так, у роботі [4] проведено аналіз сучасних методів РЕБ, їх технічних характеристик та ефективності застосування. Розглянуто різні типи засобів РЕБ, зокрема активні та пасивні системи, що застосовуються для захисту від радіолокаційного виявлення. Також досліджено проблеми, які виникають під час використання РЕБ як військовими, так і цивільними організаціями. Наведено приклади сучасних технологій використання засобів РЕБ, а також способи маскуванню об'єктів від виявлення радіолокаційними системами противника. Крім того, проаналізовано роль засобів РЕБ у сучасних умовах, підкреслюючи їх важливість для збереження життя і здоров'я особового складу підрозділів, знищення техніки противника та виконання бойових завдань. Також у науковій статті наведені основні методи

протидії РЕБ. Для забезпечення працездатності електронних систем в умовах впливу радіосигналів використовуються такі методи, як комплексний технічний контроль, маскування, захист від кібератак, системи захисту від електромагнітного імпульсу та резервні системи зв'язку й комунікацій.

У [5] автори дослідили сучасні методи РЕБ та їх вплив на перебіг бойових дій. Актуальність цього дослідження визначається зростаючою роллю РЕБ у сучасних локальних конфліктах та війнах. У роботі наведені такі ключові аспекти, як російські методи РЕБ, а саме: аналіз основних розробок та їх роль у військових операціях, західні методи РЕБ, в рамках огляду провідних розробок та їх застосування у сучасних війнах. Також надано порівняння російських і західних підходів до РЕБ та зроблено прогнози щодо їх подальшого розвитку. Окремо досліджено сучасні характеристики РЕБ, зокрема використання мобільних систем, їх гнучкість і інтеграція з іншими технологіями. Особливу увагу приділено питанням захисту від РЕБ.

Автори роботи [6] виклали матеріали, які є інструментом для аналізу та порівняння різних типів систем РЕБ та радіолокаційних засобів. Зміст публікації охоплює ключові технічні параметри, необхідні для розробки та удосконалення сучасних систем РЕБ, зокрема ефективність засобів подавлення та захисту, методи інтеграції з іншими системами озброєння та технологічні інновації. У контексті наукових публікацій, цей посібник може бути використаний як джерело для оцінки ефективності нових розробок, їхнього впливу на оперативні можливості військ та удосконалення засобів радіоелектронного захисту.

У [7] було розглянуто прогрес рф в адаптації інноваційних підходів до ведення війни, зокрема в мережецентричних технологіях та використанні інформаційного середовища. Головний акцент у роботі робиться на інтеграцію автоматизованих систем управління, розвідки, спостереження та зв'язку, що дозволяє збройним силам рф покращити швидкість прийняття рішень і посилює їх здатність до швидкого реагування. Автори роботи наголошують, що рф успішно скорочує розрив між теоретичними напрацюваннями військової науки та практичним використанням можливостей засобів. Особливо це помітно у застосуванні концепції “множників сили” – комплексного підходу, що дозволяє підвищити ефективність військових операцій. Попри це у роботі висвітлені висновки, що використання російських засобів РЕБ на південному сході України не створює значних загроз для країн-членів НАТО, оскільки Альянс володіє набагато сучаснішими технологіями. Крім того, автори вважають, що заяви офіційних представників рф про повну здатність технічно подавлювати електромагнітний спектр є перебільшеннями.

У науковій публікації [8] проведений аналіз застосування збройними силами рф засобів РЕБ під час збройної агресії проти України. Розглядається призначення та надані зображення основних сучасних систем та комплексів РЕБ рф, які були виявлені на території України з початку повномасштабного вторгнення збройних сил рф на території України.

Автори роботи [9] зосереджували дослідження на аналізі новітніх засобів РЕБ рф оперативного рівня, включаючи їх порівняльний аналіз та оцінку можливостей подавлення та їх функціональні можливості в районах ведення бойових дій. У дослідженні зроблено висновки щодо потенційних стратегій підвищення ефективності українських засобів РЕБ. Автори також звертають увагу на тенденції розвитку РЕБ та новітніх систем управління військами і зброєю в провідних країнах світу. Аналіз цих тенденцій вказує на необхідність перегляду традиційних підходів до ведення РЕБ у сучасних умовах та у майбутньому. Запропоновані шляхи модернізації та удосконалення засобів РЕБ, щоб відповідати вимогам сучасних викликів на полі бою. Це вимагає асиметричного і випереджувального підходу до розвитку засобів РЕБ у відповідь на глобальні тенденції.

Таким чином, аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що на теперішній час присвячена достатня кількість наукових робіт в яких дослідженні ТТХ існуючих засобів РЕБ рф. Проте, переважна більшість робіт присвячена дослідженням засобів РЕБ оперативного та стратегічного призначення. Слід зазначити, що в роботах, які підлягали аналізу не були розглянуті питання аналізу засобів РЕБ тактичного призначення, а питання тактики застосування взагалі не були висвітлені в жодній публікації. Враховуючи той факт, що використання ударних FPV-дронів з початком широкомасштабного вторгнення збройних сил рф на територію України носить системний характер та є ефективним засобом ураження противника, постає актуальна задача дослідження методів і способів протидії засобам РЕБ противника. Отже, отримані результати досліджень є актуальними та можуть стати підґрунтям для розробки пропозиції щодо протидії засобам РЕБ рф або удосконалення ударних FPV-дронів.

Мета статті полягає в аналізі ключових тактико-технічних характеристик та тактики застосування основних російських засобів РЕБ ближньої дії (окопних РЕБ).

Основна частина

1. Класифікація засобів РЕБ збройних сил рф. Війська РЕБ збройних сил рф – це структурний підрозділ РЕБ спеціальних військ збройних сил рф. Підрозділи військ РЕБ виконують завдання, спрямовані на досягнення переваги в електромагнітному спектрі, забезпечення захисту власних систем управління військами і озброєнням від впливу радіоелектронних перешкод противника, а також порушення функціонування систем управління військами противника і зниження ефективності використання його бойових засобів.

До структурних підрозділів РЕБ збройних сил рф належать: батальйони, вузли (центра), роти, авіаційні ланки РЕБ тощо.

Основу сил РЕБ рф становлять наземні та авіаційні частини і підрозділи, що входять до складу об'єднань і з'єднань різних видів та родів військ збройних сил рф. Засоби РЕБ утворюють систему озброєння РЕБ, яка включає сукупність технічних

засобів підрозділів РЕБ, а також бортові системи РЕБ, які призначені для індивідуального захисту ОВТ (ракетних комплексів, бойових літаків, вертольотів, кораблів, броньованих машин тощо) від засобів розвідки та високоточної зброї.

Класифікація засобів РЕБ рф включає кілька основних категорій, які ґрунтуються на їхніх функціях, призначенні та типах носіїв. Зазвичай, засоби РЕБ рф класифікують за такими показниками [10].

За дальністю застосування засоби РЕБ рф поділяються на [10]:

- стратегічного застосування;
- оперативного застосування;
- тактичного застосування;
- ближньої дії (окопний РЕБ).

За місцем базування засоби РЕБ рф класифікують [10]:

- наземні засоби;
- авіаційні засоби;
- морські засоби;
- космічні та повітряно-космічні засоби;
- мобільні засоби.

За функціональним призначенням засоби РЕБ класифікують таким чином [10]:

- перешкод наземним засобам;
- перешкод авіаційним засобам;
- перешкод морським засобам;
- радіоелектронного захисту.

До засобів РЕБ рф належать [10]:

- спеціальна наземна техніка перешкод;
- техніка управління перешкодами;
- системи радіорозвідки та пеленгування;
- передавачі перешкод;
- техніка радіо-, радіотехнічного контролю;
- авіаційні та корабельні бортові засоби перешкод.

Досвід російсько-української війни свідчить, що однією з основних рис ведення бойових дій (операцій) є широке застосування обома сторонами цієї війни БпЛА військового призначення різних типів. Нарощування їх кількісно-якісного складу, надання їм властивостей ударної зброї та масоване застосування на полі бою обумовило зміни в характері збройної боротьби, формах та способах застосування військ (сил).

Одним із шляхів зменшення бойових можливостей БпЛА є побудова та застосування відповідної РЕБ та її інтеграція в систему протиповітряної оборони (ППО). Слід констатувати, що збройні сили рф постійно адаптують свою систему під сучасні виклики та загрози. Для визначення вимог до ОВТ необхідно знати спроможності ворога. Це є первинною основою подальших досліджень. З урахуванням первинності характеристик ОВТ противника, а саме засобів РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ) доцільним є провести аналіз основних ТТХ зазначених засобів.

2. Аналіз ТТХ існуючих засобів РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ). Використання ударних FPV-дронів (First Person View) у військових операціях на території України носить оперативне та тактичне значення. У контексті війни в Україні, де бойові дії ведуться у різноманітних умовах та терито-

ріальних обмеженнях, ударні FPV-дрони стають важливим інструментом для обох сторін цієї війни. Головне завдання засобу РЕБ протидії БпЛА – це захист особового складу та військової техніки від БпЛА супротивника різних типів. Засоби РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ) є універсальними комплексами для протидії ударних FPV-дронів, у вигляді комплексу встановленого на даху транспортного засобу, в окопі (бліндажу) або використання особовим складом у вигляді переносного комплексу.

Під засобами РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ) в рамках даної публікації розуміється – спеціалізований пристрій, призначений для подавлення каналу управління БпЛА на відстані до 2000 метрів. Основна мета застосування засобів окопного РЕБ – це забезпечення протидії від знищення ударними БпЛА стаціонарних укріплень, ОВТ та особового складу [11].

Основні вимоги до засобів РЕБ рф ближньої дії (окопний РЕБ):

- забезпечення ефективного подавлення каналів управління та навігації БпЛА на відстань не менше 2000 метрів, що в свою чергу дозволяє своєчасно нейтралізувати загрози від ударних FPV-дронів;
- спрямованість сигналу, із застосуванням високонаправлених антен, що в свою чергу дозволяє сконцентрувати енергію випромінювання на конкретному БпЛА, зменшуючи при цьому ймовірність виявлення засобу РЕБ;
- широкий частотний діапазон подавлення сигналів;
- мала вага та розміри;
- забезпечення достатнього енергопотенціалу (потужні акумуляторні батареї);
- наявність режимів імітації перешкод;
- стійкість до різних кліматичних умов та впливу електромагнітного випромінювання;
- простота управління;
- відсутність впливу електромагнітного випромінювання на оператора під час тривалого застосування;
- можливість швидкого розгортання в різних умовах бойового середовища.

Аналіз засобів РЕБ рф щодо протидії БпЛА дозволив зробити висновки стосовно застосування певних заходів, які здійснюються для протидії, а саме:

- створення загороджувальних завад на частотах, які використовуються цивільними засобами зв'язку для управління БпЛА (типів частоти стільникового та транкінгового зв'язку, 3G, 4G, 5G, мережі Wi-Fi, Wi-Max тощо);
- виявлення параметрів спеціалізованих каналів радіоуправління (КРУ) БпЛА та створення радіоелектронних завад, спрямованих за частотою та структурою сигналу КРУ (включаючи й КРУ у режимі з перебудовою частоти);
- формування шумових завад, спрямованих за частотами найбільш поширених супутникових радіонавігаційних систем (GPS, ГЛОНАСС, BeiDou, Galileo тощо);
- створення імітаційних завад, спрямованих за частотою та структурою незахищених каналів найбільш поширених супутникових радіонавігаційних систем (GPS, ГЛОНАСС, BeiDou, Galileo тощо).

Застосування засобів РЕБ, як протидії БпЛА, порівняно із засобами вогневого ураження має наступні переваги:

- під час застосування засоби РЕБ не витрачають жодних матеріальних ресурсів ураження, а лише відновлюваний ресурс електромагнітної енергії;
- сучасні засоби РЕБ здатні формувати широкий спектр радіоелектронних завад, адаптивно обираючи ті, які є максимально ефективними проти конкретних об'єктів подавлення;
- засоби РЕБ мають площинний ефект, що дозволяє одночасно уражати велику кількість БпЛА зі схожими радіоелектронними параметрами;
- за умови успішного розпізнавання цілей як окремих випромінювальних радіоелектронних об'єктів (ВРЕО), засоби РЕБ можуть бути вибірко-вими, подавляючи лише ВРЕО з певними параметрами, наприклад, пункти управління БпЛА, які формують систему керування зі специфічною структурою сигналів;
- у деяких випадках, за умови успішного виявлення структури сигналів та формату переданих повідомлень у системі керування та навігаційному каналі, засоби РЕБ дозволяють перехопити управління БпЛА та нав'язати йому хибну траєкторію польоту.

Далі більш детально розглянемо ТТХ основних засобів РЕБ, які використовуються збройними силами рф в російсько-українській війні. У межах даної публікації, засоби РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ) розподіляються на дві групи:

- пересувні засоби РЕБ (кругова діаграма спрямованості сигналу);
- переносні засоби РЕБ (направлена діаграма спрямованості сигналу).

Першим у роботі проведений аналіз засобів РЕБ, які відносяться до групи пересувних засобів.

Мобільний комплекс РЕБ “Леер-2” (рис. 1) призначений для проведення радіоелектронної розвідки, постановки радіоелектронних перешкод РЕЗ, імітації роботи РЕЗ, а також оцінювання електромагнітної обстановки при проведенні заходів бойової підготовки. Розробник – ВАТ Всеросійський науково-випробувальний інститут “Еталон” (м. Москва). Прийнятий на озброєння у 2013 році. Екіпаж комплексу 2 чоловіка (водій та оператор-офіцер) [12].



Рис. 1. Мобільний комплекс РЕБ “Леер-2” [12]

Основні ТТХ мобільного комплексу РЕБ “Леер-2” наведені в табл. 1 [12]. Загалом, мобільний комплекс РЕБ “Леер-2” характеризується високою мобільністю, точністю та здатністю ефективно діяти в широкому діапазоні частот, що робить його придатним для широкого спектра радіоелектронних задач.

Таблиця 1 – Тактико-технічні характеристики мобільного комплексу РЕБ “Леер-2” [12]

Характеристика	Значення
Діапазон частот радіо- і радіотехнічного контролю, МГц	0,1 – 18000
Точність навігаційної прив'язки, м	>15
Час розгортання, хв	10
Потужність випромінювання, Вт: для дахових антен для щоглових антен	не менше 200 не менше 500
Точність пеленгування, град: для дахових антен для щоглових антен	3 2
Швидкість огляду по частоті під час виявлення з пеленгування, МГц/с	не менше 2000
Електроживлення: від промислової мережі:	380 В 50 Гц 380 В
Сумарна потужність, яка споживається, кВт	до 4,5
Базове шасі	ГАЗ-2330 “Тигр”

Комплекс РЕБ БпЛА “Шиповник-Арео” (рис. 2) призначений для радіоподавлення (блокування) каналів управління БпЛА. Розробник – “Объединенная приборостроительная корпорация” (м. Москва).



Рис. 2. Комплекс РЕБ з БпЛА “Шиповник-Арео” [12]

Можливості комплексу “Шиповник-Арео”:

- автоматизований пошук, виявлення, пеленгування, ідентифікація і визначення типів сигналів працюючих ліній управління БпЛА;
- формування списку частот, його класифікація, перехоплення, аналіз і визначення характеристик каналу управління БпЛА;
- радіоподавлення каналів управління БпЛА шляхом комплексного застосування трьох методів: блокування каналу навігації за рахунок постановки перешкод навігаційному полю GPS, радіоелектронному подавленню каналу управління БпЛА, перехоплення управління БпЛА за рахунок введення в канал управління корекції.

У табл. 2 наведені основні ТТХ комплексу РЕБ з БпЛА “Шиповник-Арео” [12].

Таблиця 2 – Тактико-технічні характеристики комплексу РЕБ з БпЛА “Шиповник-Арео” [12]

Характеристика	Значення
Діапазон частот радіо- і радіотехнічного контролю, МГц	25–2500
Діапазон робочих частот РЕП управління БпЛА, МГц	400–500, 800–925, 2400–2485
Час виявлення БпЛА, сек	близько 25
Час виявлення БпЛА, якщо частоти відомі заздалегідь, мкс	близько 700
Точність пеленгування, град	2–3
Час на розгортання станції, хв	20–40
Екіпаж машини, чол.	3 (водій, 2 оператора)

Ці характеристики демонструють, що комплекс РЕБ “Шиповник-Арео” є ефективним інструментом для виявлення, пеленгування та подавлення сигналів управління БпЛА, проте потребує певного часу на розгортання та налаштування, що робить його відносно вразливою ціллю для ураження. Слід зазначити, що діапазон робочих частот комплексу обмежує його застосування в сучасних умовах ведення бойових дій.

На рис. 3 представлений переносний комплекс “Стриж”. Він призначений для автоматичного виявлення сигналу управління БпЛА, блокуванню виявлених сигналів або сигналів навігації.



Рис. 3. Переносний комплекс “Стриж” [12]

У табл. 3 наведені основні ТТХ переносного комплексу “Стриж” [12]. Враховуючи відносно невеликі габаритні показники та сектор подавлення, зазначений комплекс є доволі дієвим засобом для протидії БпЛА в межах взводного опорного пункту.

Таблиця 3 – Тактико-технічні характеристики переносного комплексу “Стриж” [12]

Характеристика	Значення
Системи навігації, які подавляються	GPS, Глонас
Діапазон робочих частот подавлення, МГц	433, 868, 1575, 1600, 2400, 5800
Дальність дії, м	до 1000
Сектор подавлення, град	360
Розмір, см	35×35×170
Вага, кг	46

На рис. 4 до вашої уваги представлений подавлювач БпЛА “Серп-ВС6”, який призначений для подавлення каналів управління БпЛА, та заваді роботи приймача сигналів навігаційних супутникових систем на відстані до 5 кілометрів.



Рис. 4. Подавлювач БпЛА “Серп-BC6” [12]

У табл. 4 наведені основні ТТХ подавлювача БпЛА “Серп-BC6” [12]. Дальність дії даного засобу РЕБ та його різноманітність щодо діапазону робочих частот надає йому основну перевагу в порівнянні із іншими розглянутими засобами.

Таблиця 4 – Тактико-технічні характеристики подавлювач БпЛА “Серп-BC6” [12]

Характеристика	Значення
Діапазон робочих частот подавлення, МГц	430–470, 840–910, 925–960, 1160–1280, 1570–1610, 2400–2500, 2500–2600, більше 5715
Дальність дії, м	до 5000
Сектор подавлення, град	360
Випромінююча потужність, Вт	до 80
Вага, кг	10

На рис. 5 зображений мобільний комплекс “Патруль”, який розгортається на шасі легкових автомобілів типу “Пікап”. Він призначений для ведення безперервного радіоспостереження, виявлення сигналів управління БпЛА та формування сигналів протидії. У табл. 5 наведені основні ТТХ мобільного комплексу “Патруль” [12]. Особливістю даного комплексу РЕБ є його розгортання на шасі легкових авто. Параметри даного комплексу дозволяють здійснювати протидію БпЛА на великій відстані, що в свою чергу надає можливості розгорнути комплекс на великій відстані від лінії бойового зіткнення. Це робить його відносно захищеним від ураження.



Рис. 5. Мобільний комплекс “Патруль”

Таблиця 5 – Тактико-технічні характеристики мобільного комплексу “Патруль” [12]

Характеристика	Значення
Системи навігації, які подавляються	GPS, Глонас, Galileo (L1,E1, G1), BeiDou
Діапазон робочих частот подавлення, МГц	400–6000, Wi-Fi, LTE
Автономність, хв	до 40
Дальність дії, м	до 25000
Сектор подавлення, град	360

За результатами аналізу пересувних засобів РЕБ збройних сил рф можливо зробити такі висновки:

- широкий діапазон частот у більшості розглянутих засобів РЕБ дозволяє ефективно подавляти як навігаційні, так і комунікаційні системи БпЛА, що робить їх універсальними для різних ситуацій;

- мобільність пересувних засобів РЕБ забезпечується компактними розмірами і можливістю встановлення на різні типи шасі, що дозволяє швидко переміщувати системи в район застосування та оперативно реагувати на загрози;

- антени кругової діаграми спрямованості у більшості комплексів дозволяють створювати повне подавлення в радіусі їх дії, забезпечуючи надійний захист у будь-якому напрямку, що є особливо важливим у динамічних бойових умовах;

- точність виявлення та пеленгування радіосигналів підвищує ефективність протидії БпЛА, дозволяючи швидко виявляти джерела загроз та їх подавляти.

Отже, пересувні засоби РЕБ демонструють високу ефективність у сучасних бойових умовах, особливо у протидії БпЛА, завдяки своїй мобільності, дальності дії та здатності до адаптації до різних типів загроз.

Далі аналізу підлягають малогабаритні переносні засоби РЕБ у форматі різного роду “електронних автоматів” або “електронних гвинтівок”, які регулярно презентуються у рф починаючи із 2015 року, коли проблемі протидії БпЛА почали приділяти підвищену увагу. Відмінними рисами цих переносних комплексів РЕБ, у порівнянні з пересувними є:

- відсутність будь-якої розвідувальної підсистеми, що дозволяє виявляти параметри каналів управління БпЛА;

- використання для подавлення шумових завад, спрямованих на найпоширеніші частоти каналів навігації та каналів зв'язку з БпЛА;

- низький енергопотенціал, що зумовлює малу дальність дії;

- використання спрямованих антенних систем, які співпадають за орієнтацією з напрямком самого пристрою;

- використання у складі засобів РЕБ акумуляторних батарей з обмеженим зарядом – на декілька годин епізодичного застосування;

- для деяких мобільних засобів РЕБ вказуються медичні обмеження щодо тривалості використання цих пристроїв оператором через негативний вплив електромагнітного випромінювання.

Для прикладу, у роботі наведені ТТХ трьох переносних комплексів РЕБ збройних сил рф.

Переносний комплекс “Піщаль-ПРО” (рис. 6) призначений для зриву польотного завдання БпЛА, шляхом подавлення каналів зв'язку, управління та навігації. У табл. 6 наведені основні ТТХ переносного комплексу “Піщаль-ПРО” [12].



Рис. 6. Переносний комплекс “Піщаль-ПРО” [12]

Таблиця 6 – Тактико-технічні характеристики переносного комплексу “Піщаль-ПРО” [12]

Характеристика	Значення
Системи навігації, які подавляються	GPS, Глонас, Galileo, BeiDou
Діапазон робочих частот подавлення, МГц	433, 915, 1500, 2400, 5800
Автономність, хв	до 60
Дальність дії, м	до 2000
Ємність вбудованої АКБ, А/ч	10
Розмір, см	200×240×930
Вага, кг	3,2

На рис. 7 зображено переносний комплекс комплексу “Стиллет”. Його призначення тотожне комплексу “Піщаль-ПРО”. У табл. 7 наведені основні ТТХ переносного комплексу “Стиллет” [12].



Рис. 7. Переносний комплекс “Стиллет” [12]

Таблиця 7 – Тактико-технічні характеристики переносного комплексу “Стиллет” [12]

Характеристика	Значення
Системи навігації, які подавляються	GPS, Глонас, Galileo, BeiDou
Діапазон робочих частот подавлення, МГц	390–490, 850–1400, 2200–2400
Автономність, хв	до 40
Дальність дії, м	до 1000
Ємність вбудованої АКБ, А/ч	-
Розмір, см	-
Вага, кг	9

На рис. 8 зображено переносний комплекс боротьби з БпЛА “Праща-01”. Він призначений для подавлення каналів зв'язку, управління та навігації БпЛА. У табл. 8 наведені основні ТТХ переносного комплексу боротьби з БпЛА “Праща-01” [12].



Рис. 8. Переносний комплекс боротьби з БпЛА “Праща-01” [12]

Таблиця 8 – Тактико-технічні характеристики переносного комплексу боротьби з БпЛА “Праща-01” [12]

Характеристика	Значення
Системи навігації, які подавляються	GPS, Глонас, Galileo, BeiDou
Діапазон робочих частот подавлення, МГц	400–5800
Автономність, хв	до 60
Дальність дії, м	до 2500
Сектор подавлення, град	20
Розмір, см	260×900×140
Вага, кг	7

Аналіз відмінних рис переносних комплексів РЕБ та їхніх ТТХ дозволяє зробити висновок, що ці засоби є найменш “інтелектуальними” та найменш ефективними при вирішенні завдання протидії малим БпЛА. З одного боку, простота та мобільність цих засобів дозволяє їх використовувати окремими операторами без спеціалізованої підготовки. З іншого боку, ці засоби можуть застосовуватися лише епізодично і орієнтовані на найпростіші БпЛА. Використання даними типами засобів направленої діаграми спрямованості, потребують постійного візуального спостереження та супроводу БпЛА, що в реальних бойових умовах стає важкою задачею для оператора.

Відсутність у функціоналі розглянутих засобів РЕБ режимів формування імітуючих завад по каналу навігації, призводить до того, що стратегія руху БпЛА в умовах шумового подавлення каналів управління та навігації стає фактично непередбачуваною. Незважаючи на заявлені виробниками таких пристроїв ефекти, як падіння БпЛА, приземлення БпЛА або повернення БпЛА до пункту управління, фактична стратегія руху БпЛА визначається виключно його програмою дій у разі втрати зв'язку і може суттєво відрізнятись від зазначених, аж до продовження польоту відповідно до задалегідь заданої програми.

Таким чином, слід констатувати, що у випадках великої інтенсивності ведення бойових дій, розглянуті засоби РЕБ є малоефективними та потребують постійного супроводження БпЛА оператором

3. Тактика застосування засобів РЕБ рф. Російсько-українська війна – це війна технологій, людського ресурсу та мотивації. У цьому контексті засоби РЕБ відіграють важливу роль у військових операціях як технологічний елемент. Новітні комплекси РЕБ рф (засоби РЕБ ближньої дії) мають можливість вибіркового подавлення сигналів, спрямовуючи свою потужність лише на певні частоти, на яких працюють системи зв'язку, БпЛА тощо. Наприклад, квадрокоптери типу Mavic 3 використовують частотні діапазони 2,4 ГГц і 5,8 ГГц, і сучасні засоби РЕБ рф здатні створювати спрямовані перешкоди лише на цих частотах, не впливаючи на інші діапазони [13].

Для розуміння відмінностей в тактиці застосування засобів РЕБ збройними силами рф в російсько-українській війні, розглянемо два стислих приклади тактики застосування засобів РЕБ збройними силами США в Іраку (1991 рік) та збройними силами рф у війні в Грузії (2008 рік). Під час операції “Буря в пустелі” збройні сили США використовували РЕБ як ключовий елемент для нейтралізації засобів зв'язку і систем управління збройних сил Іраку. Тактика застосування полягала у тому, що перед початком активних бойових дій підіймався в повітря спеціальний літак РЕБ, призначений для подавлення радіоелектронних сигналів на широкому діапазоні частот, які використовували збройні сили Іраку [14].

Літак РЕБ створював інтенсивні перешкоди на всіх частотах, що унеможливило координацію дій іракських військ та їх ефективне управління. Після цього проводився масований пуск крилатих ракет, які вражали ключові цілі, в тому числі радіолокаційні станції (РЛС) та системи ППО. Наступним етапом,

авіація США наносила удари по залишкових об'єктах та військових підрозділах, які були позбавлені можливості ефективно оборонятись через порушення системи управління. Така послідовність – спочатку подавлення засобів зв'язку РЕБ, потім застосування високоточної зброї і авіації – дозволяла знизити бойові можливості військових сил Іраку і забезпечити успіх військової операції. Проте, збройні сили США не мали в арсеналі окопних або малогабаритних засобів РЕБ для ближнього застосування, які б могли ефективно працювати на тактичному рівні безпосередньо в зоні бойових дій, і цей аспект і на теперішній час залишається недостатньо розвиненим у їхній тактиці застосування засобів РЕБ [14].

Слід зауважити, що подібна ситуація спостерігається і в європейських країнах членів НАТО, де виробники переважно зосереджували свою увагу на розробці засобів радіоелектронної розвідки. Ці засоби спеціалізуються на перехопленні сигналів і розкритті планів противника, надаючи інформацію для стратегічного аналізу. Дана ситуація становить певні виклики та загрози для сучасних військових операцій, водночас, міжнародні партнери України усвідомлюють цю проблему.

У ході війни в Грузії в 2008 році збройні сили рф зіткнулися з проблемою, коли використання літаків Ан-12ПП для подавлення грузинських РЛС призводило до впливу не лише на ворожі системи, а й на російські станції, що знаходилися на відстані 100–120 км від зони постановки перешкод. Аналогічні ситуації виникали при застосуванні наземних комплексів РЕБ, які одночасно порушували лінії зв'язку як грузинських, так і російських військ [10]. Попри намагання вирішити цю проблему шляхом підвищення точності та селекції радіоелектронних ударів, рф на момент широкомасштабного вторгнення збройних сил рф у лютому 2022 року не вдалося досягти ефективного вирішення. Крім того, при розробці нових комплексів РЕБ було недостатньо враховано наявність у зоні конфлікту цивільних радіоелектронних засобів зв'язку, які використовуються службами екстреної допомоги, рятувальними підрозділами, поліцією тощо. Дані канали зв'язку є важливими для координації дій в умовах військових операцій, що створило додаткові виклики та загрози для російських військових. Для вирішення даної проблеми збройні сили рф почали системно застосовувати засоби РЕБ ближньої дії під час російсько-української війни. Таким чином, дослідження питань тактики застосування засобів РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ) є актуальною задачею, питанням дослідження якої на теперішній час присвячена обмежена кількість робіт.

Тактика застосування засобів РЕБ рф під час ведення бойових дій включає кілька основних етапів, які забезпечують ефективність та максимальну результативність їх використання.

По-перше, перед надходженням засобів РЕБ до військових підрозділів збройних сил рф, вони проходять всебічні випробування в лабораторних умовах, а також тестуються на полігонах за участю операторів БпЛА. Лише після цього засоби РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ) передаються для використання в бойових умовах.

Як вже було зазначено, дані засоби РЕБ були випробувані на полігонах і демонструють ефективність у реальних умовах бойових дій. Окопні засоби РЕБ активно застосовуються різними підрозділами збройних сил рф для захисту власних позицій, особового складу та військової техніки від загроз, які надходять від БпЛА.

По-друге, засоби РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ) підрозділи збройних сил рф розгортають вздовж лінії бойового зіткнення біля взводних опорних пунктах, спостережних постів. Також зазначені засоби РЕБ встановлюються на автомобілях, бойових броньованих машинах. Переносні комплекси РЕБ застосовуються окремим особовим складом, який має спеціальну підготовку щодо його застосування. Слід зауважити, що незважаючи на простоту використання переносних засобів РЕБ, при застосуванні їх ненавченим особовим складом, виникають труднощі пов'язані із візуальним виявленням БпЛА і його подавленням. Це пов'язане із неправильним розумінням оператора, а саме як правильно використовувати переносні комплекси РЕБ у яких використовується спрямована діаграма направлення подавляючого сигналу. У сфері РЕБ методи розгортання систем радіоелектронного подавлення значно відрізняються залежно від типу, класу та конструктивних особливостей цих систем. Мобільні системи, навпаки, мають широкий арсенал засобів переміщення. Це можуть бути причепи, вантажні автомобілі, пікапи або бойові броньовані машини. Завдяки своїй маневреності, ці системи є найбільш адаптивними та малопомітними засобами РЕБ, здатними виконувати різноманітні бойові завдання в умовах ведення бойових дій.

Засоби РЕБ, які розгорнуті на взводних опорних пунктах, спостережних постах, автомобілях в більшості випадків виявляють БпЛА до моменту їх візуального контакту та нейтралізують їх на безпечній відстані. Залежно від типу БпЛА, він здійснить аварійну посадку, повернеться на місце запуску або буде знесений вітром. У будь-якому випадку, БпЛА не зможе виконати своє завдання за призначенням.

Однак, дані засоби РЕБ здатні виконувати й інші завдання: дезорієнтувати розвідувальні БпЛА або створювати хибні цілі для ударних FPV-дронів.

Радіус дії засобів РЕБ залежить від їхнього типу та потужності: окопні системи мають менший радіус, а тактичні – більший. Дані засоби використовують принцип модуляції, змінюючи характеристики сигналу під час передачі. Іншим тактичним завданням є блокування зв'язку між бойовими підрозділами на невеликих відстанях. Окопні засоби РЕБ мають низку характеристик, що роблять їх ефективними у боротьбі з сучасними електронними загрозами. Висока мобільність та можливість швидкого розгортання поблизу зони бойових дій є їхніми ключовими перевагами. Окопні системи РЕБ здатні забезпечити надійний захист військових об'єктів вздовж ліній бойового зіткнення. Для окопних засобів РЕБ характерне розташування на відстані 50–100 метрів від об'єкта (наприклад, бліндажу або опорного пункту). Оператори переміщують військову техніку для укриття або безпечної зміни місця. У разі пеленгації засобів РЕБ та її знищення оператори таким чином залишаються поза небезпекою.

До недоліків цих систем можна віднести обмежений радіус дії та залежність від місцевості для забезпечення ефективної роботи. Крім того, вони можуть бути вразливими до засобів радіоелектронної розвідки при наявності точних даних про їхнє розташування.

Переносні засоби РЕБ призначені для мобільного використання на різних типах техніки або безпосередньо окремим особовим складом. Вони відзначаються високою мобільністю та гнучкістю, що дозволяє їх швидке розгортання в різних тактичних ситуаціях. Індивідуальні засоби РЕБ встановлюються по верх бронезилета. Під час роботи вони створюють електромагнітне поле в радіусі від 100 до 300 метрів, яке ефективно перешкоджає функціонуванню ударних FPV-дронів.

Основною перевагою переносних засобів РЕБ є їхня мобільність, що дає змогу оперативно реагувати на зміну тактичної ситуації та розгорнути засоби в ключових ділянках бою. Їхня компактність та відносна легкість також роблять їх зручними у використанні. Однак переносні системи мають певні обмеження щодо дальності дії, потужності порівняно зі стаціонарними комплексами та спрямованою діаграмою направленості. Вони також можуть бути менш ефективними за умов високої мобільності противника.

Сфера застосування переносних засобів РЕБ включає тактичні операції на передовій, спеціальні розвідувальні завдання та диверсійні операції. Вони також використовуються для захисту невеликих груп військових та перехоплення комунікацій противника на коротких відстанях.

Проведений аналіз ТТХ засобів РЕБ рф показав, що одним із дієвих напрямів протидії ударним FPV-дронів на теперішній час є застосування засобів РЕБ, а саме засобів РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ), ресурс яких, за наявності зовнішнього електроживлення, практично необмежений. При цьому, характеристики зазначених засобів РЕБ можуть бути використані одним із кількох способів або їх комбінацією:

- подавлення або нав'язування хибних режимів роботи каналів управління та радіоліній передачі даних БпЛА;

- подавлення або нав'язування хибних режимів роботи каналу навігації БпЛА, заснованого на прийомі та обробці сигналів однієї або кількох систем радіонавігації супутників.

Застосування засобів РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ), як протидію БпЛА має такі переваги:

- під час застосування засоби РЕБ не витрачають матеріальних засобів ураження, а лише відновлюваний ресурс електромагнітної енергії;

- засоби РЕБ можуть формувати широкий спектр радіоелектронних перешкод, адаптивно обираючи ті з них, які є максимально ефективними проти конкретних засобів ураження;

- засоби РЕБ володіють площинним ефектом, що дозволяє одночасно вражати велику кількість БпЛА, які мають схожі радіозасоби, єдині канали управління, принципи навігації, засновані на використанні сигналів одних і тих самих супутникових радіонавігаційних систем;

- за умови успішного визначення цілей, як окремих джерел радіоелектронної інформації, засоби РЕБ можуть бути вибіркоковими, подавляючи лише засоби з певними параметрами;

- в окремих випадках, за умови успішного розкриття структури сигналів та формату повідомлень у каналі керування і навігації, засоби РЕБ дозволяють перехопити управління БпЛА і нав'язати йому хибну траєкторію польоту;

- засоби РЕБ є достатньо мобільними та мають відносно не велику ціну за виготовлення однієї одиниці;

- не потребують великої кваліфікації операторів, які їх обслуговують та використовують в бойових умовах.

Висновки

Таким чином, аналіз ТТХ та тактики застосування засобів РЕБ рф ближньої дії (окопний РЕБ) показав, що засоби РЕБ такого типу є одним із дієвих інструментів протидії ударним FPV-дронам, які в свою чергу суттєво впливають на хід сучасних військових операцій. З початком широкомасштабного вторгнення збройних сил рф на територію України засоби РЕБ, які були проаналізовані в роботі постійно удосконалювалися з точки зору їх ТТХ та тактики застосування в бойових умовах. Також суттєво були збільшені кількісні показники їх виробництва рф, розроблена значна кількість нових комплексів. Слід констатувати, що засоби РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ) становлять суттєву загрозу в сучасних умовах ведення бойових дій.

Показовим чинником актуальності даного напрямку досліджень є той факт, що збройні сили рф з великою інтенсивністю удосконалюють засоби РЕБ, з метою відповідності їх ТТХ та тактики застосування сучасним умовам сьогодення в військових операціях. Отже, на теперішній час Збройні Сили України мають виклик щодо протидії засобам РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ), водночас жодна країна світу на мала такого досвіду протидії, тому отримані наукові результати в майбутньому можуть стати підґрунтям для розробки шляхів вирішення даної проблеми.

Напрямок подальших досліджень. Аналіз ТТХ засобів РЕБ ближньої дії (окопний РЕБ) рф та досвіду тактики їх застосування дозволив запропонувати можливі напрями подальших досліджень, які будуть спрямовані на удосконалення ударних FPV-дронів, а саме автоматичне захоплення (за допомогою сегментування зображення) та наведення на ціль у разі подавлення каналу управління БпЛА та застосування штучного інтелекту, як допоміжного інструменту при управлінні БпЛА у разі протидії засобів РЕБ противника.

Дослідження були проведені за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках конкурсу “Наука для зміцнення обороноздатності України”, назва проекту “Інформаційна технологія автоматизованого сегментування зображень об'єктів в системах націлювання ударних FPV-дронів на основі алгоритмів ройового інтелекту”, реєстраційний номер 2023.04/0153.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Russian Electronic Warfare: From History to Modern Battlefield. *Irregular warfare initiative* : веб-сайт. URL : <https://defensebridge.com/article/electronic-warfare-the-silent-battlefield-of-the-future-explained.html>
2. Семененко О. М., Бойко Р. В., Добровольський Ю. Б., Іванов В. Л., Кремешний О. І. Контррадіоелектронна боротьба як складова частина радіоелектронної боротьби в ЗСУ. *Системи озброєння і військова техніка*. 2016. Вип. 46. С. 141-145.
3. РЕБ. Що це і як засоби радіоелектронної боротьби протидіють ворожим ракетам. *Mind* : веб-сайт. URL : <https://mind.ua/publications/20269499-reb-shcho-ce-i-yak-zasobi-radioelektronnoyi-borotbi-protidiyut-vorozhim-raketam>
4. Опірський І.Р., Бибик Р.Т. Дослідження сучасних методів РЕБ та методів і засобів її протидії. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*. 2023. №29 (2). С. 99-97. <https://doi.org/10.18372/2225-5036.29.17873>.
5. Шаманов Д. О., Сорокін А. Р. Аналіз сучасних методів радіоелектронної боротьби. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2024. Т. 1 (75). С. 211-214. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.211>.
6. М. Moran. Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook. Naval Air Warfare Center Weapons Division, Point Mugu, California. 2013. P.455.
7. Міжнародний центр оборонних досліджень. Російська радіоелектронна боротьба до 2025 року. *ICDS Report* : веб-сайт. URL : https://www.icds.ee/wp-content/uploads/2018/ICDS_Report_Russias_Electronic_Warfare_to_2025.pdf
8. Казіміров О., Власов К., Куртов А., Потіхенський А. Аналіз застосування засобів радіоелектронної боротьби збройними силами російської федерації у ході збройної агресії проти України. *Scientific Collection «InterConf+»*. 2024. №44(197), С. 670–680. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.04.2024.063>.
9. Шумигай О.В., Єрмоленко О.В. Сучасний стан багатофункціональних засобів та комплексів радіоелектронної боротьби. Тенденції та перспективні напрями їх розвитку. *Збірник наукових праць Державного НДІ випробувань сертифікації озброєння та військової техніки*. 2020. №5(3). <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.5.2020.14>.
10. Радіоелектронна боротьба : аналіз арсеналу Росії. *Defence Express* : веб-сайт. URL : https://defence-ua.com/weapon_and_tech/radioelektronna_borotba_jak_i_chim_rossija_vojuje_proti_ukrajini-708.html
11. Окопний портативний РЕБ : призначення та критерії вибору. *Здолбунів 1497* : веб-сайт. URL : <https://zdolbuniv.lv.ua/2024/05/okopnyj-portatyvnyj-reb-pryznachennya-i-kryteriyyi-vyboru/>
12. Довідник-каталог основних зразків озброєння та військової техніки які застосовуються протидіючими сторонами під час відсічі широкомасштабного вторгнення рф в Україну (24.02.2022-30.06.2023) : Центр досліджень воєнної історії Збройних Сил України. Київ, 2023. 245 с.
13. Найтехнологічніша зброя війни – РЕБ : що пропонують Залужний та інженери, щоб перемогти Росію. Радіо Свобода. веб-сайт. URL : <https://www.radiosvoboda.org/a/reb-voyna-ukraina-rossia/32706892.html>
14. Операція “Буря в пустелі”. 25 років потому. *3 полк військово-патріотичний центр*. веб-сайт. URL : <https://3polk.com.ua/articles/history/operatsiya-burya-v-pusteli-25-rokiv-potomu.html>

Received (Надійшла) 23.09.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.11.2024

**Analysis of the tactical and technical characteristics and tactics
of the application the main electronic warfare systems (short-range) of the russian federation**

H. Khudov, I. Hridasov, I. Khizhnyak, I. Yuzova, Y. Solomonenko, T. Kalimulin, R. Raikov

Abstract. The subject of the article is the tactical and technical characteristics and the tactics of employment the main short-range electronic warfare (EW) systems (trench EW) used by the armed forces of the russian federation in the Russian-Ukrainian war. **The aim** is to analyze the tactical and technical characteristics of the main short-range EW systems (trench EW) and their tactics of employment. **Tasks** include the identification and classification of the EW systems of the russian federation armed forces, analysis of the main technical parameters of short-range EW systems (trench EW), and the study of strategies for employing short-range EW systems (trench EW) in combat operations. **The methods** employed are: comparative analysis, data clustering methods, analytical and empirical methods for analyzing the application of EW systems in the Russian-Ukrainian war. **The following results were obtained.** A structured analysis of the tactical and technical characteristics and the tactics of employment of the short-range EW systems (trench EW) of the russian federation armed forces was conducted, highlighting their advantages and disadvantages, and proposals for further research were formulated. The practical significance of the obtained results may serve as the basis for improving the existing strike FPV drones used by the Armed Forces of Ukraine, particularly in counteracting the suppression of their control channels by EW systems. **Conclusions:** the analysis of the tactical and technical characteristics and tactics of employment of the short-range EW systems (trench EW) of the russian federation showed that such EW systems are one of the effective tools in countering strike FPV drones, which, in turn, significantly impact the course of modern military operations. Since the beginning of the large-scale invasion of the russian armed forces into ukrainian territory, the EW systems analyzed in this study have been continuously improved in terms of their tactical and technical characteristics and their employment in combat conditions. Additionally, their production rates in the russian federation have significantly increased, with a considerable number of new complexes developed. It is important to note that short-range EW systems (trench EW) pose a significant threat in modern combat conditions. A key factor demonstrating the relevance of this research direction is the fact that the russian armed forces are intensively enhancing their EW systems to ensure their tactical and technical characteristics and employment tactics are aligned with the current demands of military operations. Therefore, at present, the Armed Forces of Ukraine face the challenge of countering short-range EW systems (trench EW), while no other country in the world has encountered such extensive experience in dealing with these threats. Hence, the scientific results obtained in this study may provide the groundwork for developing solutions to this problem in the future. **The research was conducted** with grant support from the National Research Foundation of Ukraine within the framework of the competition “Science for Strengthening Ukraine’s Defense Capability,” project title “Information Technology for Automated Segmentation of Objects in Targeting Systems for Strike FPV Drones Based on Swarm Intelligence Algorithms,” registration number 2023.04/0153.

Keywords: electronic warfare, FPV drone, tactical and technical characteristics, tactics of employment, trench electronic warfare, unmanned aerial vehicle.

Oleksandr Shefer, Stanislav Myhal

National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine

ANALYSIS OF THE MAIN REQUIREMENTS FOR 5G/6G NETWORKS

Abstract. Not long ago, the fifth-generation (5G) telecommunications standard was introduced, and active development is already underway for the sixth-generation (6G) standard. **The subject of the study** is the key characteristics and requirements of 5G/6G networks. **The purpose of the research** is to conduct a comparative analysis of the main features of communication networks built using 5G and 6G technologies. **The following results have been obtained.** Several key aspects of research directions and new technologies for designing 6G radio access networks, which meet the requirements of future wireless communication systems, have been examined. The main characteristics of terrestrial communication networks that must meet the declared requirements for 6G applications are analyzed in detail. Requirements for fifth-generation communication networks are identified, including distributed processing and analysis of large data volumes combined with content caching and delivery to mobile devices, support for ultra-low latency, scalability of arrays, and mobile communication management. These are compared with the projected features of sixth-generation communication networks. **Conclusions.** The transition to 6G will inevitably intensify the requirements for fifth-generation communication networks and introduce new ones to ensure the operation of systems demanding ultra-high reliability, high availability, and ultra-low response times.

Keywords: telecommunication network, communication network, terrestrial network, aerial network, radio access network, 5G standard, 6G standard, SDN network.

Introduction

This study examines the architecture of a terrestrial network capable of handling traffic from all levels, including dynamic terrestrial and flying networks. The terrestrial network, which serves as the core of the system, is designed with the requirements of 6G applications in mind [1]. The key features of 6G Radio Access Networks (RAN) focus on creating ultra-dense, heterogeneous, intelligent, and adaptive networks while improving overall network energy efficiency [2]. Integrating terrestrial and flying networks is one of the most complex challenges [3]. The network core is considered using the Software-Defined Networking (SDN) paradigm [4]. The core incorporates SDN multi-controller structures and OpenFlow switches [5]. The system must ensure interaction between terrestrial and flying networks, meeting 6G requirements. Integrated flying networks are key components of 6G networks [6]. These networks are expected to play a significant role in fulfilling the 6G wireless communication requirements. Moreover, their integration with terrestrial networks is highly demanded. However, such infrastructure faces numerous challenges, including the interaction of heterogeneous channels, processing vast amounts of traffic, and meeting security requirements [7]. This paper outlines the essential specifications supported by inter-layer communication technologies, primary use cases, and key performance indicators (KPIs) for various network levels. The architecture of the terrestrial network processes all types of traffic [8]. Numerical modeling and simulation using high-level software continuously support hardware prototyping within such a network model, helping to predict performance and interpret results [9]. Additionally, the development of the model includes determining precise technical specifications, such as power, bandwidth, and interfaces required by devices and equipment. These include radio access modules, high-performance edge computing nodes, SDN controllers, OpenFlow switches, and network interfaces [10]. The characteristics of all key network devices and elements are also defined.

Objective of the Study: To conduct a comparative analysis of the main characteristics of communication networks built using 5G and 6G technologies.

1. Radio Access Networks

The design of 6G Radio Access Networks (RAN) encompasses several key aspects and technologies that align with the requirements of future wireless communication systems. While 6G standards are not yet fully defined, several research directions and emerging technologies for designing 6G RAN have already been identified. Below are some of the key aspects:

Spectrum Utilization: 6G RAN is expected to utilize a broad range of frequency bands, including higher-frequency ranges such as terahertz (THz) and sub-terahertz (sub-THz) frequencies. These bands provide extensive resources for high-speed data transmission and massive device connectivity. Developing efficient spectrum utilization methods, such as advanced beamforming, carrier aggregation, and dynamic spectrum sharing, will be critical to maximizing 6G RAN capacity and efficiency.

Massive MIMO and Beamforming: Massive Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) technology, combined with advanced beamforming techniques, will be a core component of 6G RAN. Massive MIMO involves deploying a large number of antennas on both base stations and user devices, enabling spatial multiplexing and enhanced spectral efficiency. Beamforming focuses radio signals toward specific users, improving coverage, capacity, and signal quality. These technologies will be further advanced in 6G to support even larger antenna arrays and more complex beamforming algorithms.

Ultra-Dense Networks: 6G RAN will incorporate ultra-dense networks, where base stations and access points are densely and systematically deployed. This network densification will increase capacity, coverage, and overall system performance. Advanced technologies such as network densification, small cell deployment, and dynamic base station coordination will be employed to mitigate interference and optimize resource utilization.

Heterogeneous Networks: 6G RAN will integrate various wireless access technologies, including traditional cellular networks, satellite communications, and new wireless technologies. This integration will enable seamless connectivity, continuous coverage, and efficient resource allocation. 6G RAN design will focus on developing protocols and algorithms to support seamless handovers, network selection, and efficient traffic routing between diverse transmission devices. This will facilitate the full integration of terrestrial and aerial communication layers. Deploying new technologies, including artificial intelligence (AI), distributed edge computing, and SDN, will help achieve these goals.

Intelligent and Adaptive Networks: 6G RAN will leverage artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) techniques to create more intelligent and adaptive networks. AI/ML algorithms can be used for proactive network optimization, predictive resource allocation, dynamic spectrum management, interference minimization, and self-healing. These intelligent and adaptive features will allow the network to adjust to changing conditions, optimize performance, and provide personalized services based on user demands and network status.

Energy Efficiency: With energy consumption becoming a critical concern, 6G RAN will place significant emphasis on improving energy efficiency. Design approaches such as energy-efficient hardware, power management mechanisms, and the development of intelligent algorithms for transitioning to sleep modes will be adopted to minimize energy consumption while maintaining performance.

2. Terrestrial Network

The terrestrial network is a ground-based communication network that must meet the requirements set for 6G applications. The terrestrial layer of 6G acts as the heart of the system. All traffic from all levels is transmitted through the terrestrial network, which imposes significant limitations on its design. The overall structure of the terrestrial layer of such a system consists of two main parts: the Radio Access Network (RAN) and the Network Core.

RAN (Radio Access Network): This consists of the radio communication technologies and solutions deployed to provide ground-based communication services and support ground users.

Network Core: It manages the traffic of radio access networks and other levels to meet the requirements of 6G systems. The core network will be built using the Software-Defined Networking (SDN) paradigm. SDN with multiple controllers will be used to manage the vast amounts of network traffic. A special algorithm will need to be implemented on SDN controllers to address the placement and distribution of these controllers. The SDN network core should have the following characteristics.

Network Programmability: The SDN network core for 6G networks is expected to offer a high level of network programmability. This will allow network operators to dynamically configure and manage network resources, services, and protocols through SDN APIs. Such programmability will enable flexible and efficient

resource distribution according to the constantly changing demands and traffic characteristics, supporting heterogeneous traffic from various applications and communication channels.

Virtualization and Orchestration: The SDN network for 6G systems will use Network Function Virtualization (NFV) and orchestration methods. An NFV MANO platform will be implemented to realize multiple virtualized network functions. Virtualization allows network functions to be decoupled from hardware and run in a virtual environment. Orchestration refers to the automated coordination and management of virtualized network functions for deployment, scaling, and managing network services. Virtualization and orchestration provide efficient resource utilization, scalability, and flexibility for the network core.

Service-Oriented Architecture (SOA): The 6G systems will use a service-oriented architecture (SOA) for the SDN network core. SOA enables the decomposition of network functions into smaller reusable components (network services). These services can be dynamically combined to create custom network fragments tailored to specific applications or service requirements. SOA promotes flexibility, scalability, and efficient service delivery in the network core.

Network Slicing: Network slicing will be a key feature of the SDN network core for 6G. It will allow the creation of multiple logical networks (slices) on a shared physical infrastructure, each optimized for specific use cases, applications, or service requirements. Network slices ensure individualized resource allocation, guaranteed Quality of Service (QoS), and isolation between different network services, allowing the network core to efficiently support diverse 6G use cases with varying network performance requirements.

Intelligent Resource Management: The SDN network core will include mechanisms for intelligent resource management. These mechanisms will use artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) algorithms to optimize resource allocation, traffic routing, and load balancing based on real-time network conditions, user demands, and performance requirements. Intelligent resource management will enhance network efficiency, scalability, and QoS in 6G networks.

Functional Interoperability and Open Interfaces: The SDN network core will use open interfaces and standardized protocols to ensure compatibility between network components, domains, and providers. This will promote seamless interaction between different network elements, support an environment with multiple operators, and foster innovation, allowing third-party applications and services to leverage the capabilities of the network core.

3. Comparison of Requirements for 5G and 6G Communication Networks

In the ITU-R M.2083-0 recommendation, the key design principles for fifth-generation (5G) communication networks are flexibility and diversity to support a wide range of use cases [11]. These requirements vary in importance depending on the

specific use case. The general list of existing requirements for 5G networks is shown in Table 1.

Table 1 outlines the following scenarios:

eMBB (enhanced Mobile Broadband): Distributed processing and analysis of large data, along with content caching and delivery to mobile devices.

uRLLC (ultra-Reliable Low Latency Communications): Support for ultra-low latency and scalable arrays.

mMTC (massive Machine-Type Communications): Management of mobile communications.

Table 1 – Requirements for Fifth-Generation Communication Networks

Possibility	Requirements	Scenario
Peak data rate over terrestrial channels	20 Gbit/s	eMBB
Peak data rate over radio channels	10 Gbit/s	eMBB
User data rate over terrestrial channels	100 Mbit/s	eMBB
User data rate over radio channels	50 Mbit/s	eMBB
Latency	4 ms	eMBB
	1 ms	uRLLC
Mobility	500 km/h	eMBB,
		uRLLC
Density of connections	10 ⁶ /km ²	mMTC
Throughput	10 Mbit/cm ²	eMBB

In Table 1, the requirements for uRLLC networks include latency and mobility. Additionally, the round-trip latency must be imperceptible to humans, with a maximum of 1 ms for applications within the uRLLC group. Furthermore, mobility support must be maintained even at maximum object speeds of 500 km/h. Moreover, communication networks with ultra-low latency require data transmission reliability greater than 99.9999% [11]. Implementing these requirements ensures high reliability and accuracy of real-time data transmission, which is essential for applications in autonomous technology, telemedicine, industrial automation, and more. To build the corresponding level of network infrastructure, advanced technologies such as multi-user MIMO, broader frequency spectra, high-frequency bands, and intelligent optimization of network and device operations must be used. Additionally, new data analytics and processing technologies, as well as artificial intelligence, are needed to handle large volumes of information and make decisions based on the data obtained.

The architecture must be flexible and scalable, consisting of layers that interact with each other through separate network interfaces [11]. There should be control and efficient distribution of network resources. Overall, the implementation of uRLLC services requires a comprehensive approach to the development of network infrastructure and the use of advanced technologies. The transition to 6G strengthens the discussed requirements and introduces new ones (Table 2).

Let's break down the key differences between 5G and 6G technologies:

Table 2 – Comparison of 5G and 6G

Parameters	5G	6G
Start of operation	2020	Approximately 2030
Information transfer speed	20 Gb/s	1 Tb/s
Frequency ranges	3 – 300 GHz	1 – 10 THz
Accuracy / error	m - level	cm - level
Coating	2D	3D
Connection density (km ²)	10 ³ devices	10 ⁶ devices
Delay (ms)	4 – 5	0.1
Jitter	1 ms	1 μs
Security	Low	High, using block-chain technology
Battery life	Limited by battery size	Unlimited battery life*
Spectral efficiency (Hz)	30	100
Mobility support (vehicle speed)	More than 500 km/h	More than 1000 km/h
Satellite communication	No	Yes

* – zero-power devices and chips with external power supply function are used

Mobility: The maximum allowable speed will increase from 500 km/h to 1000 km/h.

Network latency: End-to-end latency will decrease by a factor of 10.

Throughput: The maximum throughput for 6G will be 1 Tbps, which is 1000 times faster than in 5G.

Energy efficiency and spectrum utilization: Energy efficiency will increase by a factor of 100.

Next, let's focus on reliability, security, and availability in more detail.

Reliability. Reliability refers to the probability that the system will operate without failure over a specific period. As 6G networks will be highly distributed, the main task for ensuring reliability will be organizing effective coordination of computing nodes. To achieve this, appropriate data transmission protocols between network nodes are necessary, as well as a reliable backbone network capable of handling large amounts of traffic generated during data storage and retrieval.

Availability. Availability refers to the probability that the system will be functioning correctly at any given moment. Distributed AI solutions for 6G networks are a promising option to reduce learning time while simultaneously lowering resource consumption, thus enhancing the availability of AI-based systems and services.

Security. Security is the system's ability to protect itself by detecting threats in a timely manner and taking the necessary actions to safeguard services deployed within the system, as well as data exchanged between devices and users. For 6G network services, distributed AI/MN algorithms are necessary for local model training to detect and eliminate threats, ensuring the confidentiality of end-user data. Furthermore, security also refers to the system's ability not to cause harm to human life, the environment, or private property. Since 6G networks will feature use cases where human life may be at risk, such as with autonomous vehicles, the role of AI/MN becomes particularly crucial.

Availability and Reliability. Availability can only be achieved after reliability is ensured. Reliability is the

probability that the system is operational overall, while availability refers to the probability that it is operational at a specific moment in time. Availability guarantees that authorized access to the system will not be denied. A major advantage of distributed systems is that the presence of many nodes and communication channels helps prevent failures. Current trends in edge computing research aim to enhance system availability through careful planning of task and data transfers from end devices to edge servers, using mechanisms that make decisions based on network statistics and the computational capabilities of edge servers. Additionally, availability can be increased by reallocating tasks from failed nodes to functioning ones. Since availability and reliability are interrelated, it is important to note that both characteristics need to be balanced against each other, as different systems may require different values for these characteristics.

Conclusions

The article examines key aspects of research directions and new technologies for designing 6G radio access networks that meet the requirements of future wireless communication systems. It provides a detailed analysis of the main characteristics of terrestrial networks that must meet the requirements for 6G applications. The requirements for fifth-generation communication networks have been outlined for the following scenarios: distributed processing and analysis of large data, along with content caching and delivery to mobile devices; support for ultra-low latency and scalable arrays; management of mobile communications. The transition to 6G will inevitably strengthen the requirements for fifth-generation networks and introduce new ones that will ensure the operation of systems requiring ultra-high reliability, high availability, and ultra-low latency.

REFERENCES

1. Allam Z. Future (post-COVID) digital, smart and sustainable cities in the wake of 6G: Digital twins, immersive realities and new urban economies. / Z. Allam, D.S. Jones // Land use policy – 2021. 101, – P. 105201.
2. Ismail, S.F., Kadhim, D.J. Towards 6G Technology: Insights into Resource Management for Cloud RAN Deployment. *IoT*. 2024. Vol. 6, is. 2. Pp. 409–448. DOI: 10.3390/iot5020020
3. Ye, F., Li, J., Zhu, P., Wang, D., You, X. Intelligent Hierarchical NOMA-Based Network Slicing in Cell-Free RAN for 6G Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2024. Vol. 23, is. 5. Pp. 4724–4737. Doi: 10.1109/TWC.2023.3321717
4. Chowdhury, M. Campaign: A Personalized Offloading, Semantic Communication, Latency-aware Resource Slicing and SFC Orchestration for SDN and NFV Empowered 6G Serverless Computing Network. *IAENG International Journal of Computer Science*. 2024. Vol. 51, is. 10. Pp. 1480–1515. URL: <https://www.iaeng.org/journals.html>
5. Liotou, E., Alexiou, A., Passas, N., Merakos, L. QoE-centric implementation of SDN platform for Open-Flow-based network path selection. 2021 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking, *MeditCom* 2021. Pp. 234–239. Doi: 10.1109/MeditCom49071.2021.9647453
6. Ahmad, R., Ayyash, M., Salameh, H.B., El-Khazali, R., Eigala, H. Indoor Flying Networks for 6G: Concepts, Challenges, Enabling Technologies, and Opportunities. *IEEE Communications Magazine*. 2023. Vol. 61, is. 10. Pp. 156–162. Doi: 10.1109/MCOM.009.2200559
7. Oommar, S.S., El-Haleem, A.M.A., Ibrahim, I.I., Saleh, A.M. Capacity Enhancement of Flying-IRS Assisted 6G THz Network Using Deep Reinforcement Learning. *IEEE Access*. 2023. Vol.11. Pp. 101616–101629. Doi: 10.1109/ACCESS.2023.3315660
8. Wang, J., Zhou, Y., Wang, B. Design of 6G Space-Ground Integrated Network Architecture Based on Ground Core Network. 2023 International Wireless Communications and Mobile Computing, *IWCMC* 2023. Pp. 1250–1255. Doi: 10.1109/IWCMC58020.2023.10182977.
9. Ahmadi H. Networked twins and twins of networks: An overview on the relationship between digital twins and 6G / H. Ahmadi, A. Nag, Z. Khar, K. Sayrafian, S. Rahardja // *IEEE Communications Standards Magazine*, – 2021. № 5(4). – P. 154 – 160.
10. Lu Y., Maharjan, S., Zhang Y. Adaptive edge association for wireless digital twin networks in 6G. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. Vol. 8, is. 22. Pp. 16219 – 16230. Doi: 10.1109/IIOT.2021.3098508
11. ITU-T Recommendation Y.3104. Architecture of the IMT-2020 network. ITU-T. Geneva. December, 2018.

Received (Надійшла) 25.08.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.11.2024

Аналіз основних вимог до мереж зв'язку 5G/6G

О. В. Шефер, С. В. Мигаль

Аноація. Предметом дослідження є основні характеристики та вимоги до них у мережах 5G/6G. Метою дослідження є проведення порівняльного аналізу основних характеристик мереж зв'язку, побудованих за технологіями та 6G. **Отримані наступні результати.** Розглянуті деякі ключові аспекти напрямів досліджень і нових технологій для проектування мереж радіодоступу 6G, що відповідають вимогам майбутніх систем бездротового зв'язку. Детально розглянуті основні характеристики мережі наземного зв'язку, яка повинна забезпечити для застосунків 6G заявлені вимоги. Виділені вимоги до мереж зв'язку п'ятого покоління для розподіленої обробки та аналізу великих даних разом з кешуванням контенту та доставкою на мобільні пристрої; підтримки наднизької затримки, а також масивів, що масштабуються; управління мобільними комунікаціями. Проведено їх порівняння із плануемими характеристиками мереж зв'язку шостого покоління. **Висновки.** Перехід до 6G у будь-якому разі посилює вимоги до мереж зв'язку п'ятого покоління та додасть нові, що забезпечать функціонування систем, які вимагають надвисокої надійності, високою доступності і наднизького часу відгуку.

Ключові слова: телекомунікаційна мережа, мережа зв'язку, наземна мережа, літаюча мережа, мережа радіодоступу, стандарт 5G, стандарт 5G, мережа SDN.

М. А. Штомпель

Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

БІОІНСПІРОВАНА ОПТИМІЗАЦІЯ НЕДВІЙКОВИХ КОДІВ З МАЛОЮ ЩІЛЬНІСТЮ ПЕРЕВІРОК НА ПАРНІСТЬ

Анотація. У роботі запропоновано біоінспірований підхід до оптимізації недвійкових кодів з малою щільністю перевірок на парність. На першому етапі розробленого методу оптимізації задаються характеристики передавання інформації та параметри обраної процедури біоінспірованої оптимізації. Ключовий етап методу полягає у ітеративному пошуку перевіркою матриці з використанням обраної біоінспірованої процедури оптимізації із застосуванням комп'ютерного моделювання. Моделювання процесу передавання інформації проводиться для заданого методу модуляції та обраних параметрів каналу зв'язку. Побудова наборів перевіркою матриць недвійкових кодів з малою щільністю перевірок на парність здійснюється на основі методу progressive edge growth. Оцінювання ефективності кожної згенерованої перевіркою матриці засновано на обчисленні коефіцієнту помилок за результатами ітеративного декодування на основі розповсюдження довіри. Для програмної реалізації запропонованого підходу розроблено алгоритм біоінспірованої оптимізації недвійкових кодів з малою щільністю перевірок на парність. Представлений метод оптимізації даних недвійкових кодів доцільно використовувати для підвищення ефективності систем радіозв'язку нового покоління.

Ключові слова: біоінспірована оптимізація, ефективність, коди з малою щільністю перевірок на парність, недвійкові коди, системи радіозв'язку.

Вступ

Постановка проблеми. Технології радіозв'язку нового покоління передбачають надання сучасних послуг електронних комунікацій, серед яких можна виділити Інтернет речей, віртуальну та доповнену реальність тощо. Впровадження цих послуг висуває підвищені вимоги до достовірності передавання інформації, затримки обробки даних у вузлах мережі та досягнення високої пропускнуєї спроможності [1, 2]. З метою забезпечення даних вимог пропонуються новітні методи оброблення інформації, зокрема, методи завадостійкого кодування. Серед наявних завадостійких кодових конструкцій важливу роль у сучасних засобах радіозв'язку відіграють коди з малою щільністю перевірок на парність (МЩПП-коди). Дані коди характеризуються високою ефективністю методів кодування та декодування з прийнятною обчислювальною складністю [3]. Довгі випадкові двійкові МЩПП-коди дозволяють практично досягти меж пропускнуєї спроможності для деяких моделей каналу зв'язку при використанні методу ітеративного декодування на основі розповсюдження довіри. З іншого боку, на практиці у сучасних технологіях радіозв'язку застосовуються відносно короткі МЩПП-коди. Перевірочні матриці даних кодів характеризуються наявністю коротких циклів, що значно погіршує ефективність декодування за розповсюдженням довіри. Для подолання цього обмеження застосовуються різноманітні процедури, спрямовані на оптимізацію структури перевіркою матриці МЩПП-коду з обраними параметрами. Відомо, що недвійкові МЩПП-коди мають кращу корегувальну здатність порівняно з еквівалентними двійковими кодами, тому актуальним завданням є розширення їх застосування у системах радіозв'язку нового покоління [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [5] запропоновано новітній підхід до побудови МЩПП-кодів на базі схеми передавання зовнішньої

інформації протографу для систем радіозв'язку з рознесеними передавальними та приймальними антенами. Отримані у роботі коди мають вищу енергетичну ефективність та кращі показники у діапазоні високого відношення сигнал/завада.

У сучасних системах радіозв'язку застосовуються різні типи просторовозв'язаних МЩПП-кодів, що потребують оптимізації для заданих умов застосування. Наприклад, у [6] побудова та оптимізація усічених кільцевих МЩПП-кодів даного класу, що декодуються за розповсюдженням довіри з перетасуванням, здійснюється на основі адаптованої схеми передавання зовнішньої інформації. Подальший розвиток оптимізації просторовозв'язаних МЩПП-кодів та підвищення їх ефективності при застосуванні віконного декодування засновано на впровадженні нової метрики – віконного середнього параметру [7]. Для обґрунтування, отриманих у роботі результатів, додатково було визначено структурні характеристики оптимізованих кодів.

У [8] запропоновано підхід до побудови квазіциклічних регулярних МЩПП-кодів на базі евристичної процедури імітації відпалу, що дозволяє отримати коди з покращеними характеристиками у діапазоні високого відношення сигнал/завада.

У [9] представлена біоінспірована оптимізація нерегулярних двійкових МЩПП-кодів з використанням процедури кажанів, що ґрунтується на сформульованій оптимізаційній задачі нелінійного програмування.

Оптимізація недвійкових МЩПП-кодів для систем радіозв'язку з рознесеними передавальними та приймальними антенами високої розмірності, що базується на запропонованій символній схемі передавання зовнішньої інформації, дозволяє підвищити їх ефективність для циклічного симетричного каналу зв'язку з адитивним білим гаусовим шумом [10]. У [11] представлено підхід до оптимізації недвійкових МЩПП-кодів з використанням методології матриці узгодження ваги для спеціальних моделей каналу

зв'язку та систем збереження інформації. У роботі запропоновано новітнє представлення загальних поглинальних наборів, що відіграють критичну роль у даній методології, та проведено алгебраїчний аналіз характеристик отриманих недвійкових МЦПП-кодів. Застосування алгебраїчного підходу до оптимізації недвійкових МЦПП-кодів має ряд обмежень, тому доцільно розглянути можливість біоінспірованої оптимізації даного класу кодів, що можуть бути запроваджені у системах радіозв'язку нового покоління.

Мета статті: розроблення методу біоінспірованої оптимізації недвійкових МЦПП-кодів.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо етапи оптимізації недвійкових МЦПП-кодів на основі біоінспірованого підходу.

Етап 1. Встановлення параметрів недвійкового МЦПП-коду, методу модуляції, каналу зв'язку та біоінспірованої процедури оптимізації.

На даному етапі обирається швидкість коду, довжина кодового слова, довжина інформаційного повідомлення, а також задається метод модуляції та значення відношення сигнал/завада для обраних умов передавання інформації. Крім того, обирається біоінспірована процедура для здійснення оптимізації та задаються її параметри.

Етап 2. Біоінспірована оптимізація перевірконої матриці недвійкового МЦПП-коду.

На цьому етапі спочатку застосовується обрана процедура біоінспірованої оптимізації спільно з методом progressive edge growth (PEG) для формування набору перевірконих матриць недвійкового коду із заданими параметрами. Далі для кожної з отриманих перевірконих матриць генеруються кодові слова та здійснюється комп'ютерне моделювання передавання інформації через канал зв'язку з використанням відповідного методу модуляції. Для декодування прийнятої з каналу інформації застосовується класичний метод ітеративного декодування на основі розповсюдження довіри. В якості критерію ефективності сформованої перевірконої матриці МЦПП-коду використовується підрахований коефіцієнт помилок. Далі до початкових перевірконих матриць застосовуються міграційні оператори, які визначаються обраною біоінспірованою процедурою, та формується новий набір перевірконих матриць, для якого даний процес повторюється. Проведення моделювання завершується при досягненні заданого числа ітерацій біоінспірованої оптимізації.

Етап 3. Формування оптимізованої перевірконої матриці недвійкового МЦПП-коду.

Даний етап передбачає визначення перевірконої матриці, для якої забезпечується найменше значення коефіцієнту помилок за результатами етапу 2. Отримана перевіркона матриця розглядається як близька до оптимальної для обраних параметрів передавання інформації.

Ключова особливість представленого методу оптимізації недвійкових МЦПП-кодів полягає у застосуванні деякої біоінспірованої процедури для визначення оптимальної перевірконої матриці за критерієм мінімізації коефіцієнту помилок для об-

раних умов передавання інформації. Алгоритм методу наведений на рис. 1.

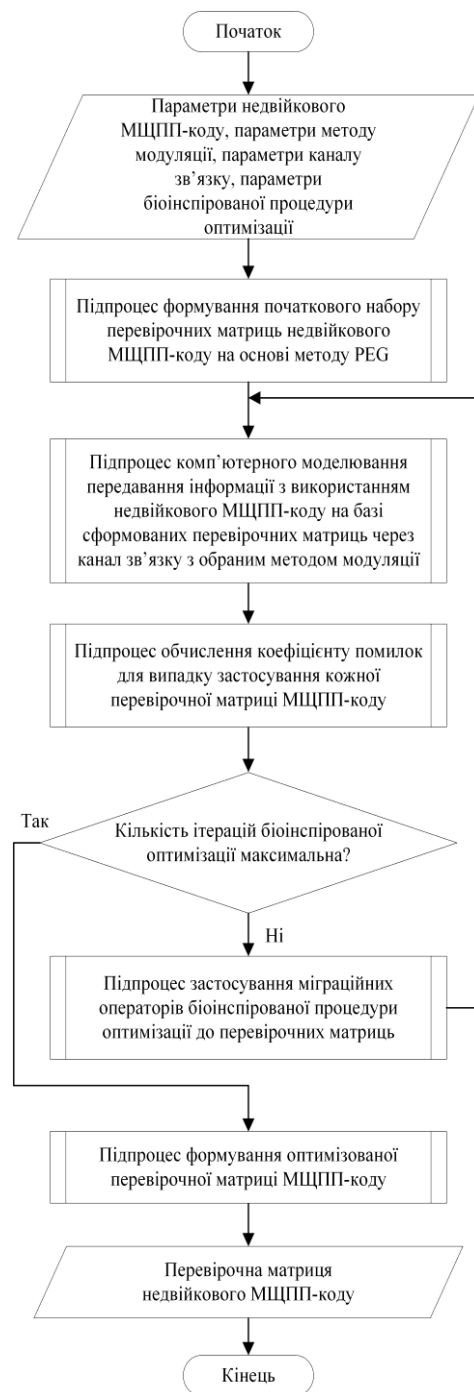


Рис. 2. Схема алгоритму біоінспірованої оптимізації недвійкових МЦПП-кодів

У даному алгоритмі вхідними даними є характеристики передавання інформації (параметри недвійкового МЦПП-коду, методу модуляції та каналу зв'язку) та параметри обраної процедури біоінспірованої оптимізації. Відповідно до алгоритму створюється початковий набір перевірконих матриць, що будуються з використанням методу PEG, для заданих параметрів недвійкового МЦПП-коду (довжини кодового слова, довжини інформаційного повідомлення та швидкості кодування). Отримані перевірконі матриці недвійкового МЦПП-коду використовуються

при проведенні комп'ютерного моделювання передавання інформації з обраним методом модуляції через канал зв'язку у заданому діапазоні сигнал/завада. За результатами проведеного моделювання обчислюється коефіцієнт помилок, що досягається при використанні кожної перевірконої матриці МЩПП-коду, при застосуванні ітеративного декодування на основі розповсюдження довіри. Якщо максимальна кількість ітерацій оптимізації не досягнута, то застосовуються міграційні оператори обраної біоінспірованої процедури для формування нового набору перевірочних матриць недвійкового МЩПП-коду та наведені вище кроки алгоритму повторюються. У результаті роботи алгоритму визначається перевірна матриця недвійкового МЩПП-коду, для якої забезпечується найменша величина коефіцієнту помилок для заданих умов передавання інформації.

Для програмної реалізації представленого алгоритму оптимізації можуть бути використані стандартні мови програмування або спеціалізовані програмні середовища моделювання.

Висновки

Недвійкові МЩПП-коди різних типів використовуються у технологіях радіозв'язку нового покоління. Структура перевірконої матриці коротких МЩПП-кодів потребує оптимізації при використанні ітеративного декодування на основі розповсюдження довіри. У роботі запропоновано біоінспірований підхід до оптимізації недвійкових МЩПП-кодів. Ключовою особливістю даного підходу є ітеративний пошук перевірконої матриці з використанням біоінспірованої процедури оптимізації та методу побудови РЕГ шляхом комп'ютерного моделювання для заданих умов передавання інформації. В якості критерію ефективності обрано коефіцієнт помилок, що визначається для кожної згенерованої перевірконої матриці МЩПП-коду. Також для практичної реалізації представленого підходу розроблено алгоритм біоінспірованої оптимізації. Запропонований метод може бути використано для підвищення ефективності передавання інформації у новітніх системах радіозв'язку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Aslam A. M., Chaudhary R., Bhardwaj A., Kumar N., Zeadally S. Metaverse for 6G and beyond: the next revolution and deployment challenges. *IEEE Internet of Things Magazine*. 2023. Vol. 6. No. 1. P. 32-39. <https://doi.org/10.1109/IOTM.001.2200248>.
2. Zhang H., Tong W. Channel coding for 6G extreme connectivity – requirements, capabilities, and fundamental tradeoffs. *IEEE BITS the Information Theory Magazine*. 2023. Vol. 3. No. 1. P. 54-66. <https://doi.org/10.1109/MBITS.2023.3322978>.
3. Geiselhart M., Krieg F., Clausius J., Tandler D., Ten Brink S. 6G: a welcome chance to unify channel coding? *IEEE BITS the Information Theory Magazine*. 2023. Vol. 3. No. 1. P. 67-80. <https://doi.org/10.1109/MBITS.2023.3322974>.
4. Noor-A-Rahim M., Liu Z., Guan Y. L., Hanzo L. Finite-length performance analysis of LDPC coded continuous phase modulation. *IEEE Trans. on Vehicular Techn.* 2020. Vol. 69. No. 10. P. 12277-12280. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3012727>.
5. Vu H. D., Nguyen T. V., Nguyen D. N., Nguyen H. T. On design of protograph LDPC codes for large-scale MIMO systems. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 46017-46029. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979156>.
6. Yang Z., Fang Y., Cai G., Zhang G., Chen P. Design and optimization of tail-biting spatially coupled protograph LDPC codes under shuffled belief-propagation decoding. *IEEE Communications Letters*. 2020. Vol. 24. No. 7. P. 1378-1382. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.2985773>.
7. Kwak H.-Y., Kim J.-W., Park H., No J.-S. Optimization of SC-LDPC codes for window decoding with target window sizes. *IEEE Trans. on Communications*. 2022. Vol. 70. No. 5. P. 2924-2938. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3158307>.
8. Sariduman A., Pusane A. E., Taskin Z. C. On the construction of regular QC-LDPC codes with low error floor. *IEEE Communications Letters*. 2020. Vol. 24, No. 1. P. 25-28. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2953058>.
9. Shtompel M., Prykhodko S., Shefer O., Halai V., Zakharchenko R., Topikha B. Performance analysis of the bioinspired method for optimizing irregular codes with a low density of parity checks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 6(9 (108)). P. 34-41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216762>.
10. Liu Q., Feng Z., Xu J., Zhang Z., Liu W., Ding H. Optimization of non-binary LDPC coded massive MIMO systems with partial mapping and REP detection. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 17933-17945. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3147273>.
11. Hareedy A., Lanka C., Guo N., Dolecek L. A combinatorial methodology for optimizing non-binary graph-based codes: theoretical analysis and applications in data storage. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2019. Vol. 65. No. 4. P. 2128-2154. <https://doi.org/10.1109/TIT.2018.2870437>.

Received (Надійшла) 00.00.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 00.00.2024

Bio-inspired optimization of non-binary low-density parity-check codes

M. Shtompel

Abstract. The paper proposes a bio-inspired approach to the optimization of non-binary low-density parity-check codes. At the first stage of the developed optimization method, the characteristics of information transmission and the parameters of the selected bio-inspired optimization procedure are set. The key stage of the method consists in iterative search of the parity-check matrix using the selected bio-inspired optimization procedure based on computer simulation. Modeling of the information transmission process is carried out for a given modulation method and selected parameters of the communication channel. The construction of sets of parity-check matrices of non-binary low-density parity-check codes is based on the progressive edge growth method. The evaluation of the performance of each generated parity-check matrix is used the calculation of the error rate based on the results of iterative belief propagation decoding. For the software implementation of the proposed approach, an algorithm of bio-inspired optimization of non-binary low-density parity-check codes has been developed. The presented method of optimizing these non-binary codes is advisable to use to improve the efficiency of new generation radio communication systems.

Keywords: bio-inspired optimization, efficiency, low-density parity-check codes, non-binary codes, radio communication systems.

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Бабич С. І.	200	Ключко Л.	109	Панченко В. І.	38
Баленко О. І.	190	Клюшніков І. М.	143	Пашченко Р. Е.	5
Басова Ю. О.	31	Ковальчук Д. І.	11	Підласий Д. А.	139
Болбас Ю. О.	194	Ковцур К. Г.	27	Підлісний Я. А.	176
Бологова Н. М.	132	Кожевніков Г. К.	92	Полторацький В. О.	52
Бурдейна Н. Б.	176	Кожушко Г. М.	31	Пономарьов Д. А.	27
Бутенко С. І.	46	Коломійцев О. В.	194	Попов А. В.	11
Василишин В. І.	194	Компанієць В. О.	187	Попов С. І.	123
Власенко Д. С.	11	Кошарський В. В.	11	Прокудін А. Ю.	169
Волков Є. Г.	11	Криховецький Г. Я.	190	Просолов В. В.	68
Гавриленко С. Ю.	38, 52	Крук О. І.	169	Птиця Н. В.	27
Гейко М. В.	38	Крюченков О. І.	96	Пустовойтов П. Є.	187, 204
Глива В. А.	180, 184	Кузнецов О. Л.	194	Райков Р. Ю.	209
Глоба Л. С.	79 84	Куц О. О.	200	Растегаєв Р. І.	132
Глушко А. Д.	169	Лада Н. В.	139	Решетнікова П. Е.	42
Горбачов П. Ф.	21	Лазоренко В.	75	Рудницький В. М.	139
Грибський О. П.	11	Ларін В. В.	139	Середюк О. А.	143
Грідасов І. Ю.	209	Лещинський В. О.	163	Скакаліна О. В.	156
Деркач Т.	109	Леві Л. І.	200	Скороделов В. В.	190
Десятко А.	75	Лоза В.	109	Скулиш М. А.	56
Дмитренко А.	109	Лубан А. С.	60	Соломоненко Ю. С.	209
Дмитренко О. А.	56	Любий Є. В.	21	Тищенко Д.	75
Дяченко В. О.	60	Маркевич М. І.	92	Ткачук К. К.	184
Євдоченко О. І.	200	Мартовицький В. О.	132	Федорченко В. М.	60
Євтушенко О. С.	64	Марюшко М. В.	5	Федюшин О. І.	68
Жила С. С.	11	Матвєєв М. І.	106	Філоненко Б. В.	132
Заковоротний О. Ю.	42, 64	Матяш О. Ю.	92	Фроленко В. О.	68
Захарченко Р. В.	31	Мигаль С. В.	219	Хижняк І. А.	209
Зубенко С. П.	60	Морозова О. І.	96	Худов Г. В.	209
Зубрицький Г. М.	190	Мошура О.	109	Церне Е. О.	11
Кавецький М. С.	68	Мурадова В.	114	Чалий С. Ф.	163
Калімулін Т. М.	209	Нікітіна Т. С.	96	Чечуй О. В.	132
Капітон А.	75	Носков В. І.	38	Шевчук С. Д.	11
Карташов А. Д.	79	Омаров М.	114	Шефер О. В.	219
Касерес А.	84	Орехов О. О.	123	Штомпель М. А.	223
Кашлев М. С.	184	Осадчий Д. Б.	180	Юзова І. Ю.	209
Кислиця Д. В.	31	Осадчий С. І.	119	Янко А. С.	169
Кислиця С. Г.	31	Охрименко М. Ю.	204	Ястреба О. С.	200

Наукове видання

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Збірник наукових праць
Випуск 4 (78)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. Ільїна*Ідентифікатор медіа R30-04135 згідно з рішенням Національної ради України
з питань телебачення і радіомовлення від 25.04.2024 № 1416Підписано до друку 29.11.2024. Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 28,25. Тираж 130 прим. Зам. 1129-24
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