

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 2 (76)

Issue 2 (76)

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 30 квітня 2024 року № 5).*

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

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

Полтава • 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*);
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*);
ТИМОЦУК Олена Миколаївна
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);
ТРИСТАН Андрій Вікторович
(*д-р техн. наук, проф., Чернігів, Україна*);
ФРОЛОВ Євгеній Андрійович
(*д-р техн. наук, проф., Полтава, Україна*);
ЧОРНИЙ Олексій Петрович
(*д-р техн. наук, проф., Кременчук, Україна*);

Відповідальний секретар:

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

Технічні секретарі:

ЗАХАРЧЕНКО Руслан Володимирович
(*канд. техн. наук, доц., Полтава, Україна*);
ПЕТРОВСЬКА Інна Юріївна
(*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*);
Andriy LUNTOVSKYY
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Mykyta MYRONTSOV
(*Dr. Sc. (Ph.&M.), Senior Res., Kyiv, 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*);
Olena TYMOSHCHUK,
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);
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>Гурін А. П., Худов Г. В., Масленко О. В., Минко П. Є., Соломоненко Ю. С.</i> Метод пошуку об'єктів інтересу за спектральними ознаками на зображеннях з активної оптико-електронної системи спостереження | 5 |
| <i>Нечаусов А. С., Горелик С. І., Андрєєв С. М., Лахтіна А. В.</i> Методика аналізу зон пішої доступності укриттів залежно від типу балістичних снарядів за допомогою сучасних засобів геопросторового аналізу | 11 |

АВТОМОБІЛЬНИЙ, РІЧКОВИЙ, МОРСЬКИЙ ТА АВІАЦІЙНИЙ ТРАНСПОРТ

| | |
|---|----|
| <i>Головань А. І.</i> Дослідження процесів адаптивізації системи технічного обслуговування за результатами зміни стану суднових технічних засобів | 18 |
| <i>Савчук В. П., Зінченко Д. О., Дзигар А. К., Сатулов А. І.</i> Порівняльний аналіз напружено-деформованого стану модернізованих поршнів малообертових суднових двигунів WARTSILA RT-FLEX96C та RTA96C | 24 |
| <i>Симбірський Г. Д., Плехова Г. А., Костікова М. В., Очеретенко С. В.</i> Застосування інформаційних технологій та мікропроцесорної техніки для проведення вимірювань у транспортних засобах | 28 |

УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

| | |
|--|----|
| <i>Вжеснєвський М. О., Чала О. О.</i> Автоматизація внутрішньо-складських виробничих логістичних процесів для впровадження концепції INDUSTRY 4.0: енергоощадливість, продуктивність, мобільність, модульність, автономність | 34 |
| <i>Запорожець О. В., Штефан Н. В., Яценко І. С.</i> Вимірювання якості програмного забезпечення на основі стандартів SQuaRE | 39 |
| <i>Леві Л. І., Бороздін М. К., Ястреба О. С.</i> Застосування комбінаторно-графового підходу до оперативного управління інженерними мережами | 44 |
| <i>Trystan A., Zhukov D., Bereznyi A.</i> Models of the system of collective self-organisation of unmanned aerial vehicles using artificial intelligence | 47 |

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

| | |
|--|-----|
| <i>Аль-Амморі Алі, Клочан А. Є., Дегтярьова А. О., Шкурко О. П., Аль-Амморі Х. А.</i> Інформаційна модель аналізу рожеж силової установки повітряних суден | 53 |
| <i>Baranenko R., Mostova A., Sas N., Kurbanova O.</i> CRM tools to ensure the protection of intellectual property rights | 60 |
| <i>Бовчалюк С. Я., Коломоєць Б. М., Коломоєць В. С., Гаращенко Я. В.</i> Розвиток моделі та структури керуючих пристроїв з паралельною архітектурою | 64 |
| <i>Бульба С. С., Соловійова О. І., Семеренко Ю. О.</i> Дослідження алгоритмів пошуку оптимального шляху | 67 |
| <i>Волк М. О., Курочкін В. С., Запорожченко А. П., Паронікян П. А.</i> Гібридний метод розподілу ресурсів в хмарних системах | 70 |
| <i>Hulevych M.</i> CIDER : assisted automation tool for C++ libraries testing | 74 |
| <i>Дяченко Д. О., Кайда В. В., Левченко А. О., Міхаль О. П.</i> Методи функціонування пристроїв IoT з використанням машинного навчання | 78 |
| <i>Єр'оміна Н. С., Колтун Ю. М., Беспалий А. В., Шматько Ю. М.</i> Аналіз сучасних методів сегментації зображень в інтересах навігації мобільних роботів | 82 |
| <i>Zhovtonizhko D., Zubenko V., Mozhaev O., Huk A.</i> Study of local image features detectors | 87 |
| <i>Заковоротний О. Ю., Хулап А. В.</i> Оптимізація обчислення нейромереж за допомогою використання цілочисельної арифметики | 90 |
| <i>Залеський В. Д., Івановський П. С., Федорченко В. М.</i> Сучасні інструменти оркестрації даних для побудови конвеєрів автоматичної обробки даних | 95 |
| <i>Іващенко Г. С., Онищенко О. І., Бондаренко М. Е., Здорик Н. В.</i> Методи рішення задачі комівояжера на основі обчислювального інтелекту | 99 |
| <i>Каргін А. О., Гієвський Д. О., Олійник Д. Г.</i> Безперервне планування і ситуаційне управління як завдання штучного інтелекту що відчуває | 106 |
| <i>Кожевніков Г. К., Черниш Д. С., Матяш О. Ю.</i> Онтологічний підхід до перерозподілу навантаження Інтернету Речей | 111 |
| <i>Ладоня В. Г., Мелешко Є. В., Якименко М. С.</i> Розробка та програмна реалізація інтелектуального вебсервісу для вивчення іноземної мови методом інтервальних повторень | 115 |
| <i>Mezin D., Kuchuk N., Lyashova A., Partyka S., Lysytsia D.</i> The method of observing moving objects | 122 |
| <i>Мінухін С. В., Башкіров М. О.</i> Дослідження ефективності методів генерації тестових даних в реляційних базах даних | 127 |

| | |
|--|-----|
| <i>Николаєнко Д. С., Філімончук Т. В., Майстренко Г. В.</i> Модель обробки спектральних даних астрономічних об'єктів | 135 |
| <i>Попович Б. Р., Заволодько Г. Е.</i> Впровадження штучного інтелекту в TestHUB | 138 |
| <i>Radchenko I., Shekhovtsov O., Kovalenko A., Sytnyk O.</i> Formation of clusters on single-board computers in IoT networks | 141 |
| <i>Skakalina O., Kapiton A.</i> Comparative analysis of the application of heuristic algorithms for solving the TSP problem | 144 |
| <i>Steblyanko B., Ni O., Kuchuk H., Volk D.</i> Fuzzy interactive clustering method | 152 |
| <i>Шматко О. В., Сальніков С. С.</i> Модель децентралізованої системи обміну електричними медичними картками на основі технології блокчейн | 155 |
| <i>Юдін О. В., Шипунов М. Ю.</i> Методи протидії автоматизованому збору інформації з вебсторінок | 163 |

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

| | |
|---|-----|
| <i>Кузьменко О. Ю., Кузьменко В. С.</i> Основи охорони праці на морському транспорті | 169 |
| <i>Столітній А. В.</i> Впровадження Е-системи під час нагляду за додержанням законів при умовно-достроковому звільненні засуджених від покарання або його заміни на більш м'яке | 173 |
| <i>Тихенко О. М., Зозуля Л. А., Зозуля С. В.</i> Композиційні безсвинцеві матеріали для захисту від іонізуючих та неіонізуючих електромагнітних полів та випромінювань | 179 |
| <i>Ченцева О. О.</i> Математичне моделювання процесів осадження пилу карбонових композитів при штучній іонізації повітря робочої зони | 183 |

ЗВ'ЯЗОК, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА

| | |
|--|-----|
| <i>Почерняєв В. М., Магомедова М. С., Сивкова Н. М.</i> Плоска фазована антенна решітка для мобільних цифрових станцій зв'язку «точка-багатоточка» НВЧ діапазону | 187 |
|--|-----|

| | |
|----------------------------------|-----|
| АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК | 191 |
|----------------------------------|-----|

Організації авторів

Варненський університет менеджменту, Варна, Болгарія
 Федеральний інститут Парани, Парана, Бразилія
 Державний НДІ випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Черкаси, Україна
 Київський фаховий коледж зв'язку, Київ, Україна
 Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна
 Міжрегіональна академія управління персоналом, Київ, Україна
 Науково-дослідний інститут воєнної розвідки, Київ, Україна
 Національна академія Служби безпеки України, Київ, Україна
 Національний авіаційний університет, Київ, Україна
 Національний аерокосмічний університет імені М. С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна
 Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна
 Національний транспортний університет, Київ, Україна
 Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна
 Національний юридичний університет імені Ярослава Мудрого, Харків, Україна
 Одеський національний морський університет, Україна
 Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна
 Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна
 Харківський національний економічний університет імені С. Кузнеця, Харків, Україна
 Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна
 Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна
 Уманський національний університет садівництва, Умань, Україна
 Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна
 Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

Authors affiliation

Varna University of Management, Varna, Bulgaria
 Instituto Federal do Parana, Parana, Brazil
 SR Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment, Cherkasy, Ukraine
 Kyiv College of Communication, Kyiv, Ukraine
 Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine
 Interregional Academy of Personnel Management, Kyiv, Ukraine
 Defence Intelligence Research Institute, Kyiv, Ukraine
 National Academy of Security Services of Ukraine, Kyiv, Ukraine
 National Aviation University, Kyiv, Ukraine
 National Aerospace University named after M.E. Zhukovsky "KHAІ", Kharkiv, Ukraine
 National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
 National Transport University, Kyiv, Ukraine
 National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine
 Yaroslav Mudryi National Law University, Kharkiv, Ukraine
 Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine
 Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
 Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
 S. Kuznets Kharkiv National Economic University, Kharkiv, Ukraine
 Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine
 Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
 Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine
 Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine
 Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Навігація та геоінформаційні системи

УДК 621.331

doi: 10.26906/SUNZ.2024.2.005

А. П. Гурін¹, Г. В. Худов¹, О. В. Масленко², П. Є. Минко³, Ю. С. Соломоненко¹

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

² Науково-дослідний інститут воєнної розвідки, Київ, Україна

³ Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МЕТОД ПОШУКУ ОБ'ЄКТІВ ІНТЕРЕСУ ЗА СПЕКТРАЛЬНИМИ ОЗНАКАМИ НА ЗОБРАЖЕННЯХ З АКТИВНОЇ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Анотація. Предметом вивчення в статті є метод пошуку об'єктів інтересу за спектральними ознаками на основі активної оптико-електронної системи, у якій в якості джерела випромінювання застосовується набір багатоспектральних лазерних випромінювачів, з подальшою комп'ютерною обробкою отриманого зображення. **Метою** є розробка методу пошуку об'єктів інтересу із застосуванням активної оптико-електронної системи з подальшою комп'ютерною обробкою отриманого зображення. **Завдання:** аналіз особливостей побудови і функціонування активних оптико-електронних систем з динамічною спектральною обробкою; розробка методу пошуку об'єктів за спектральними ознаками активною оптико-електронною системою з комп'ютерною обробкою зображень; розробка математичної моделі, яка дозволяє прийняти рішення про наявність об'єкта інтересу шляхом визначення ділянок зображення з елементами, що мають найбільше значення яскравості. Використовуваними **методами** є: методи цифрової обробки зображень, методи математичного моделювання, методи теорії оптимізації, аналітичні та емпіричні методи аналізу зображень після їх цифрової обробки. Отримані такі **результати**. Проаналізовано особливості побудови і функціонування активних оптико-електронних систем з динамічною спектральною обробкою. Розроблено метод пошуку об'єктів за спектральними ознаками активною оптико-електронною системою з комп'ютерною обробкою зображень. Розроблена математична модель, яка дозволяє прийняти рішення про наявність об'єкта інтересу шляхом визначення ділянок зображення з елементами, маючими найбільше значення яскравості. **Висновки.** Розроблено метод пошуку об'єктів за спектральними ознаками активною оптико-електронною системою з комп'ютерною обробкою зображень. Особливістю розробленого методу є застосування на початковому етапі активної оптико-електронної системи для вимірювання спектрального коефіцієнту відбиття досліджуваної ділянки, який в подальшому разом зі спектральними характеристиками об'єкта інтересу, використовується в обчисленні апаратної функції (вектора фільтру) для забезпечення підвищення контрасту зображення об'єкта інтересу. На заключному етапі проводиться комп'ютерна обробка отриманого зображення з метою визначення ділянки, на якій розміщено об'єкт інтересу, за елементами зображення з найбільшим значенням яскравості. Проведено математичне моделювання розробленого методу пошуку об'єкта інтересу в зоні спостереження. За результатами математичного моделювання рішення про наявність об'єкта інтересу було прийнято для ділянок, складові елементи яких мають найвищі показники яскравості.

Ключові слова: активна оптико-електронна система, комп'ютерна обробка зображення, пошук об'єктів на зображенні, спектральна ознака.

Вступ

Постановка проблеми. Найбільш розповсюдженими задачами, які розв'язуються оптико-електронними системами, є виявлення, розпізнавання та класифікація об'єктів. Під час розв'язання такого класу задач використовують певний опис образів (сукупність сигналів, що обробляються), які складають відмінні ознаки об'єктів. Найчастіше використовують такі групи ознак: геометричні ознаки, спектральні, енергетичні та динамічні [1].

За принципом формування інформаційних полів (полів випромінювання) усі оптико-електронні системи поділяються на пасивні та активні [2]. Пасивні оптико-електронні системи використовують інформаційні поля, які утворені природним випромінюванням у просторі об'єктів. Активний метод будови оптико-електронних систем передбачає створення інформаційного поля із застосуванням штучних джерел випромінювання.

Стаття присвячена розробці методу пошуку об'єктів за спектральними ознаками активною оптико-електронною системою з комп'ютерною обробкою зображень. При застосуванні активних оптико-електронних систем з узгодженою фільтрацією необхідна наявність даних про спектральні характеристики об'єкта інтересу та ділянки пошуку (фону) – ділянки місцевості, на якому імовірно може бути розміщений об'єкт інтересу. Відомо, що дані про спектральні характеристики ділянки пошуку не постійні, не однорідні та схильні до змін. Це пов'язано з можливою зміною погодних умов, пори року або часом доби, що робить застосування активної оптико-електронної системи з узгодженою фільтрацією не ефективною.

Особливістю розробленого методу є застосування на початковому етапі активної оптико-електронної системи для вимірювання спектрального коефіцієнту відбиття досліджуваної ділянки пошуку, який в подальшому разом зі спектральними

характеристиками об'єкта інтересу, використовується в обчисленні апаратної функції (вектора фільтру) для забезпечення підвищення контрасту зображення об'єкта інтересу. На заключному етапі проводиться комп'ютерна обробка отриманого зображення з метою визначення ділянки, на якій розміщено об'єкт інтересу, за елементами зображення з найбільшим значенням яскравості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вибір спектральних ознак обумовлений тим, що під час спектральної обробки відсутня необхідність високої просторової роздільної здатності, тому що розпізнавання може проводитися за мінімальною кількістю пікселів [3].

Також слід зазначити, що при використанні геометричних ознак необхідно мати високу просторову роздільну здатність і, отже, велику приймальну апертуру приймальної частини оптико-електронної системи, що призводить до зниження відношення сигнал-шум системи виявлення [4].

Обчисленню спектрального коефіцієнту відбиття фону присвячена робота [5]. В ній обговорюється метод, який полягає в тому, що в передавальній частині оптико-електронної системи формуються багатоспектральні лазерні сигнали однакової інтенсивності, якими послідовно опромінюється зондована поверхня. Відбиті сигнали кожної спектральної компоненти реєструються приймачем випромінювання, що дозволяє обчислити спектральний коефіцієнт відбиття як відношення випромінювання на вході приймача випромінювання до випромінюваної системою енергії. Далі, використовуючи результати обчислення спектральних характеристик фону та апріорно відомі дані про характеристики об'єкта інтересу, обчислюється вектор фільтру для зміни характеристик яскравості зондуемого багатоспектрального випромінювання в інтересах підвищення контрасту зображення об'єкта інтересу.

Також слід вказати роботи, в яких обговорюються методи виявлення спектральних аномалій на зображеннях [6; 7] та завдання сегментування зображень [8]. Під спектральною аномалією слід розуміти область невеликого розміру на зображенні, спектральні відмінності пікселів якої суттєво відрізняються від оточуючої її околиці.

Мета статті – розробка методу пошуку об'єктів за спектральними ознаками активною оптико-електронною системою з комп'ютерною обробкою зображень.

Виклад основного матеріалу

1. Особливості побудови і функціонування активних оптико-електронних систем з динамічною спектральною обробкою.

При вирішенні задач оптимального прийому сигналів зазвичай використовують методи математичної статистики і формують задачу наступним чином. Апріорно повинні бути відомі статистичні характеристики корисного сигналу та завад, - необхідно розробити пристрій, який найкращим чином може приймати рішення про виявлення об'єкту з мінімальними помилками.

Принцип побудови оптико-електронних систем з динамічною спектральною обробкою полягає в тому, що для підвищення контрасту зображення об'єкта або ймовірності виявлення використовуються багатоспектральні лазерні зондувальні сигнали. Спектральний та енергетичний склад зондуемого випромінювання формується на основі апріорних даних про спектральні характеристики фону та об'єкту таким чином, щоб на виході оптико-електронної системи формувалася найменший відгук (зареєстрований сигнал) для випромінювання, відбитого від фону, та найбільший відгук для випромінювання, відбитого від поверхні об'єкта [9].

Фізична основа побудови активних оптико-електронних систем з узгодженою обробкою оптичних сигналів полягає в тому, що кольорові поверхні мають вибіркочну здатність відбивати та поглинати світло різних довжин хвиль. Якщо поверхня здатна відбивати промені червоного кольору, то при освітленні його зеленим кольором поверхня відбиватиме мінімальну кількість енергії і, відповідно, буде чорною на зареєстрованому зображенні [10]. Це пов'язано з тим, що частина падаючого випромінювання проникає всередину середовища, в якому поглинаються спектральні компоненти, які відрізняються від червоних.

Математичною основою, що використовується при вирішенні завдань підвищення контрасту зображень об'єктів спостереження за спектральними ознаками, є векторне представлення сигналів. В активній системі зондуемый поліхроматичний сигнал формується у вигляді суми монохроматичних лазерних сигналів. Тому оптичне випромінювання, яке відбивається від об'єкта та фону, може бути представлене у вигляді векторів у багатовимірному спектральному просторі.

Використавши векторне представлення оптичних сигналів, розглянемо принцип визначення апаратної функції, яка забезпечує підвищення контрасту зображення однорідного об'єкту на однорідному фоні (рис. 1).

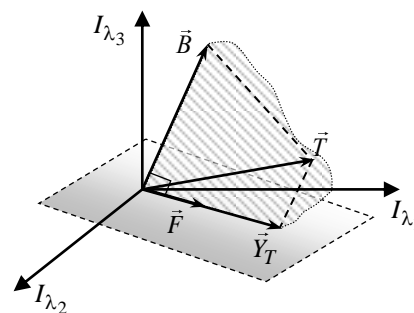


Рис. 1. Ілюстрація до динамічної спектральної обробки випромінювання однорідного об'єкту на однорідному фоні (джерело: [11])

Випромінювання об'єкту в цьому випадку характеризується вектором \vec{T} , а випромінювання, яке відбивається від фону – вектором \vec{B} . Апаратна функція розраховується на основі апріорних даних спектральних характеристик вектора об'єкту \vec{T} і вектора фону \vec{B} з використанням наступного виразу [11]:

$$\vec{F} = \frac{\vec{T} - N \cdot \vec{B}}{\|\vec{T} - N \cdot \vec{B}\|}, \quad (1)$$

де $N = \frac{\vec{T}^T \cdot \vec{B}}{\vec{B}^T \cdot \vec{B}}$ – проекція вектора об'єкту на вектор фону.

Вектор апаратної функції

$$\vec{F} = f_1 \vec{\lambda}_1 + f_2 \vec{\lambda}_2 + f_3 \vec{\lambda}_3$$

є ортогональним до вектора фону

$$\vec{B} = b_1 \vec{\lambda}_1 + b_2 \vec{\lambda}_2 + b_3 \vec{\lambda}_3,$$

та лежить в площині, яка створена вектором \vec{B} і вектором, що ілюструє спектральні властивості об'єкту

$$\vec{T} = t_1 \vec{\lambda}_1 + t_2 \vec{\lambda}_2 + t_3 \vec{\lambda}_3.$$

В алгебраїчній формі скалярний добуток являє собою операцію множення проєкцій векторів, які приймають участь у процесі селекції з подальшим їх підсумовуванням.

У випадку, який надається, скалярний добуток ортогональних векторів фону та апаратної функції дорівнює нулю, а скалярний добуток вектора об'єкту та апаратної функції відмінний від нуля

$$(\vec{T} \cdot \vec{F}) = t_1 f_1 + t_2 f_2 + t_3 f_3 \neq 0 \quad (2)$$

та характеризує величину сигналу на виході приймача оптико-електронної системи.

У роботі [9] розроблені принципи побудови активної оптико-електронної системи з динамічною спектральною обробкою, у якій джерелом випромінювання є набір багатоспектральних лазерних випромінювачів.

Для підвищення контрасту зображення використовуються апріорні дані про спектральні характеристики об'єкту та фону. У відповідності до апріорних даних обчислюється управляючий сигнал для зміни яскравості випромінювання системи лазерних випромінювачів таким чином, щоб зменшити величину спектральних складових сигналу, що відбитий від поверхні, яка належить фону, з найменшим ослабленням інтенсивності сигналу, відбитого від поверхні об'єкта.

На рисунку (рис. 2) зображена структурна схема активної оптико-електронної системи з динамічною спектральною фільтрацією, яка складається з передавальної та приймальної частин. Передавальна частина активної оптико-електронної системи складається з:

- формувача апаратної функції (1),
- бібліотеки спектральних характеристик (2);
- лазерного блоку (3),

формувача багатоспектрального лазерного пучка (4).

До приймальної частини системи входять:

- об'єктів (5),
- приймач випромінювання (6),
- електронний блок обробки (7).

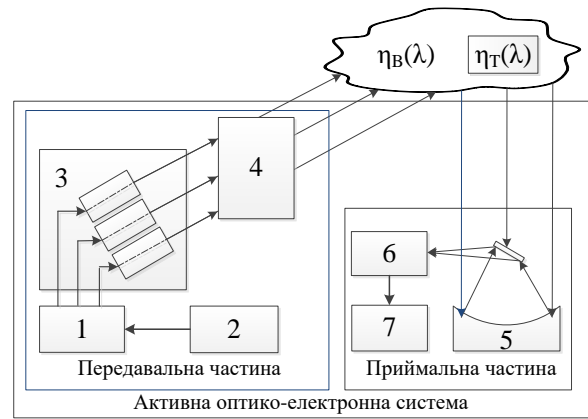


Рис. 2. Структурна схема активної оптико-електронної системи з динамічною узгодженою спектральною фільтрацією (джерело: [12])

Формувач апаратної функції призначений для створення на основі апріорних спектральних характеристик об'єкту та фону управляючого сигналу, який забезпечує на виході лазерного блоку багатоспектральне випромінювання з необхідною спектральною щільністю. Лазерний блок складається з набору лазерів, які працюють в одномодовому режимі і генерують монохроматичне випромінювання.

Формувач багатоспектрального лазерного пучка призначений для створення з набору монохроматичних лазерних сигналів поліхроматичного випромінювання та управління його кутовою розбіжністю.

В приймальній частині оптико-електронної системи відбите від зондуєчої поверхні поліхроматичне оптичне випромінювання перетворюється в електричні сигнали приймачем випромінювання та реєструється в електронному блоці обробки.

2. Метод пошуку об'єктів за спектральними ознаками активною оптико-електронною системою з комп'ютерною обробкою зображень.

Метод пошуку об'єктів за спектральними ознаками активною оптико-електронною системою складається з таких етапів:

На початковому етапі, передбачається, що в результаті опромінення багатоспектральними лазерними сигналами однакової інтенсивності зондованої поверхні приймачем випромінювання відбувається реєстрація відбитого випромінювання, на підставі якого формується цифрове RGB зображення (об'єкт інтересу на оточуючому фоні) та розраховується його математичне очікування (вектор фону) за допомогою виразу [13]:

$$\vec{\mu}_B = \frac{1}{b} \sum_{K=1}^r \vec{X}_K, \quad (3)$$

де \vec{X}_K – тривимірний вектор K -го елемента репрезентативної вибірки фону; b – кількість елементів репрезентативної вибірки фону.

На другому етапі, передбачається, що маються апріорні дані про спектральні характеристики сигналу об'єкту інтересу (вектор об'єкта інтересу), який розрахований за допомогою виразу [13]:

$$\vec{\mu}_T = \frac{1}{t} \sum_{L=1}^r \vec{X}_L, \quad (4)$$

де \vec{X}_L – тривимірний вектор L -го елемента репрезентативної вибірки об'єкта інтересу; t – кількість елементів репрезентативної вибірки об'єкта інтересу.

На третьому етапі, використовуючи числові параметри спектральних характеристик сигналів об'єкта інтересу та фону, визначається вектор фільтру \vec{F} , який забезпечує підвищення контрасту об'єкта за допомогою виразу (1).

На заключному етапі, обчислюється скалярний добуток векторів елемента цифрового RGB зображення \vec{X} та фільтру \vec{F} з метою підвищення контрасту зображення об'єкта інтересу.

Розроблений метод пошуку об'єктів передбачає подальшу комп'ютерну обробку отриманого оптико-електронною системою зображення, а саме: отримане зображення умовно поділяється на ділянки однакового розміру з подальшим обчисленням найбільшої яскравості їх елементів. Рішення про наявність об'єкта інтересу слід прийняти для ділянки з елементами, які мають найбільший показник яскравості.

3. Математичне моделювання методу пошуку об'єктів за спектральними ознаками активною оптико-електронною системою з комп'ютерною обробкою зображень.

Метою математичного моделювання було, обчисливши значення спектральних характеристик фону, та, використавши відомі значення спектральних характеристик об'єкта інтересу, здійснити цифрову обробку зображення та визначити на ньому ділянку з об'єктом інтересу за елементами з найбільшим показником яскравості.

На початковому етапі, передбачається, що в результаті опромінення багатоспектральними лазерними сигналами однакової інтенсивності зондованої поверхні приймачем випромінювання відбувається реєстрація відбитого випромінювання, на підставі якого формується цифрове RGB зображення (фон), на якому зображено причал з пришвартованими суднами, одним із яких є об'єкт інтересу – катер червоного кольору (рис. 3).

Це зображення, яке отримане за допомогою літального апарату з фотоапаратом в простих метеороумовах, яке містить (1000x920) елементів роздільної здатності. Було розраховано коефіцієнт відбиття цього зображення (вектор математичного очікування фону) за допомогою виразу (3).

На другому етапі, передбачається, що маються апріорні дані про спектральні характеристики сигналу об'єкта інтересу (вектор математичного очікування об'єкта інтересу) (рис. 4), які розраховано за допомогою виразу (9).

На третьому етапі, на підставі числових параметрів спектральних характеристик сигналів об'єкта інтересу та фону, визначається вектор фільтру \vec{F} , який забезпечує підвищення контрасту об'єкта інтересу за допомогою виразу (1).

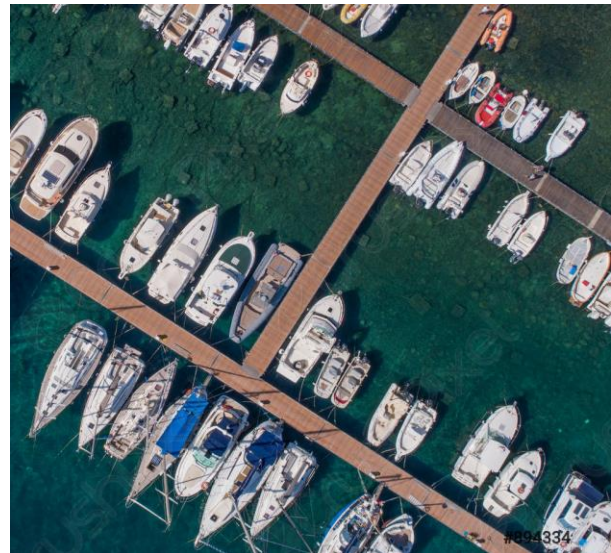


Рис. 3. Досліджуване RGB зображення (фон)
(джерело: розроблено авторами)



Рис. 4. Зображення об'єкта інтересу
(джерело: розроблено авторами)

На четвертому етапі, обчислюється скалярний добуток векторів елемента цифрового RGB зображення (\vec{X}) та фільтру (\vec{F}) з метою підвищення контрасту зображення об'єкта інтересу. На зображенні (рис. 5) представлено результат цифрової обробки досліджуваного RGB зображення (фону).

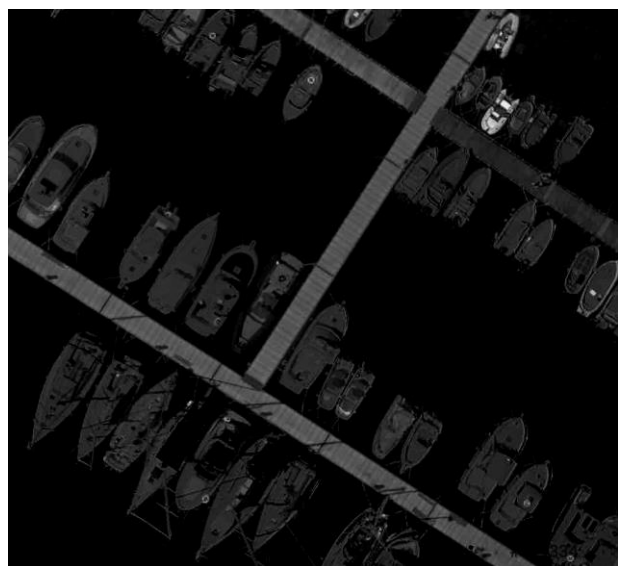


Рис. 5. Результат цифрової обробки досліджуваного RGB зображення (фону)
(джерело: розроблено авторами)

На заключному етапі, для здійснення пошуку об'єкта інтересу отримане зображення (рис. 5) слід поділити на ділянки однакового розміру та дати їм умовні позначення (наприклад, на 16 однакових ділянок) (рис. 6).

Було проведено оцінку найбільших значень яскравості елементів зображення I_{max} ($I \in [0;255]$) кожної ділянки досліджуваного RGB зображення після цифрової обробки (рис. 6). На зображенні

(рис. 7) зображено гістограму значень найбільшої яскравості елементів кожної ділянки досліджуваного RGB зображення після цифрової обробки.

Отже, за результатами математичного моделювання рішення про наявність об'єкта інтересу слід прийняти для ділянки №4 (на рис. 7 найбільше значення яскравості позначене контуром чорного квадрату), тому що елементи саме цієї ділянки мають найвищий показник яскравості ($I_{\#4max} = 255$).

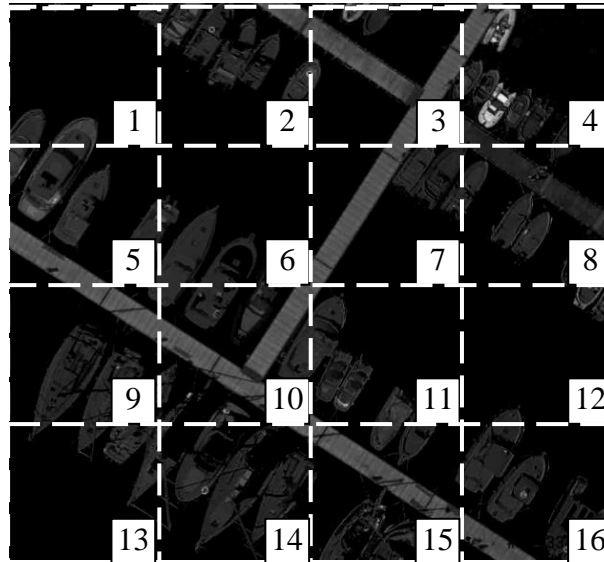


Рис. 6. Досліджуване RGB зображення (фон) після цифрової обробки, поділене на 16 однакових ділянок з умовними позначеннями (джерело: розроблено авторами)

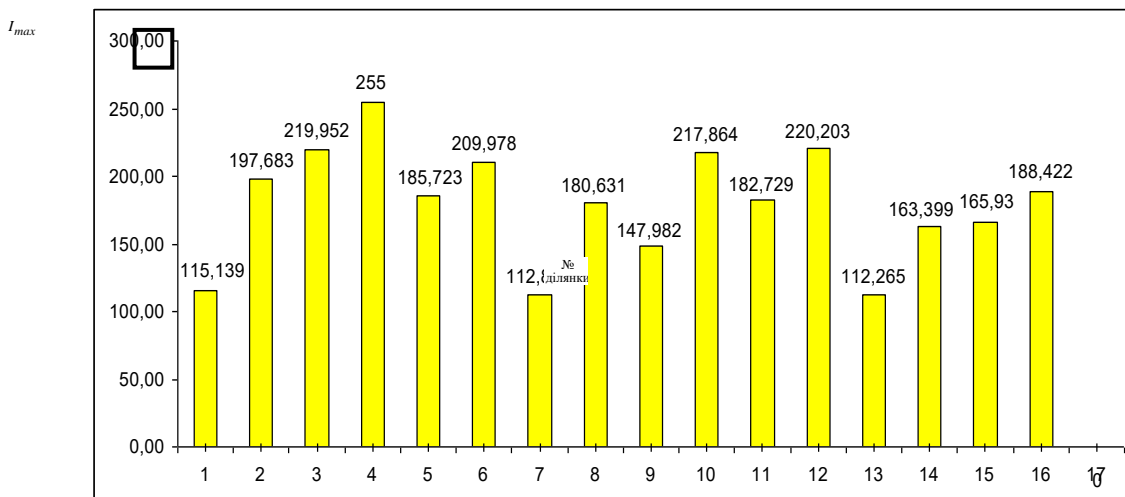


Рис. 7. Гістограма значень найбільшої яскравості елементів кожної ділянки поточного зображення №1 після цифрової обробки (джерело: розроблено авторами)

Висновки

В статті розроблено метод пошуку об'єктів за спектральними ознаками активною оптико-електронною системою з комп'ютерною обробкою зображень.

Особливістю розробленого методу є застосування на початковому етапі активної оптико-електронної системи для вимірювання спектрально-

го коефіцієнту відбиття досліджуваної ділянки пошуку, який в подальшому разом зі спектральними характеристиками об'єкта інтересу, використовується в обчисленні апаратної функції (вектора фільтру) для забезпечення підвищення контрасту зображення об'єкта інтересу.

На заключному етапі проводиться комп'ютерна обробка отриманого зображення з метою визначення ділянки, на якій розміщено об'єкт

інтересу, за елементами зображення з найбільшим значенням яскравості.

Було проведено математичне моделювання розробленого методу пошуку об'єкта інтересу в зоні

спостереження. За результатами математичного моделювання рішення про наявність об'єкта інтересу було прийнято для ділянок, складові елементи яких мають найвищі показники яскравості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Білінський Й. Й., Огородник К. В., Юкиш М. Й. Оптико-електронні системи, основні тенденції розвитку. Електронні системи : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2011. С. 14-16.
2. Skvortsov L. Active spectral imaging for standoff detection of explosives. *Quantum Electron.* 2011. No. 41(12). P. 1051–1060.
3. Manolakis D., Marden D., Shaw G. Hyperspectral image processing for automatic target detection applications. *Lincoln Laboratory Journal.* 2003. Vol. 14. No. 1. P. 79-113. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.163.733>.
4. Купченко Л. Ф., Риб'як А. С., Проклов В. В., Антонов С. Н. Виявлення об'єктів за спектральними ознаками в оптико-електронних системах з використанням принципів динамічної спектральної фільтрації. *Прикладна радіоелектроніка.* 2011. № 10(1). С. 22–26.
5. Купченко Л. Ф., Худов Г. В., Гурін А. П., Гурін О. О., Риб'як А. С. Метод вимірювання коефіцієнту відбиття фону активною оптико-електронною системою виявлення об'єктів з динамічною спектральною обробкою оптичного випромінювання. *Системи обробки інформації.* 2023. № 2(173), С. 32-39. <https://doi.org/10.30748/soi.2023.173.04>.
6. Денисова А. Ю., М'ясников В. В. Виявлення аномалій на гіперспектральних зображеннях. *Комп'ютерна оптика.* 2014. Т. 38. № 2. С. 287-296.
7. Купченко Л. Ф., Худов Г. В., Гурін А. П., Риб'як А. С., Гурін О. О. Удосконалений метод виявлення спектральних аномалій на основі інформаційного критерію Кульбака-Лейблера в системах дистанційного зондування. *Системи озброєння і військова техніка.* 2022. № 2(70). С. 56-61. <https://doi.org/10.30748/soivt.2022.70.07>
8. Kumar S., Kumar A., Lee D.-G. Semantic Segmentation of UAV Images Based on Transformer Framework with Context Information. *Mathematics.* 2022. Vol. 10. No. 24:4735. <https://doi.org/10.3390/math10244735>.
9. Kupchenko L.F., Goorin O.A., Karlov V.D., Ponomar A.V., Rybiak A.S., Natarova A.O. Active electro-optical system with dynamic spectral processing of optical radiation. *2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL).* 2019. P. 489-492. <https://doi.org/10.1109/CAOL46282.2019.9019458>.
10. Tulansky S. Curiosities of light rays and light waves. New York: American Elsevier Publishing Company, 1965. 109 p.
11. Купченко Л.Ф., Слабунова Н.В., Гурін О.А. Акустооптичний процесор в оптико-електронній системі забезпечує динамічну спектральну фільтрацію. *Прикладна радіоелектроніка.* 2016. Т. 15, № 4. С. 359-361.
12. Kupchenko L.F., Karlov V.D., Rybiak A.S., Goorin O.A., Ponomar A.V. Active electro-optical system of targets detection with dynamic spectral processing of optical radiation. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics.* 2021. Vol. 24, No 2. P. 218-226. <https://doi.org/10.15407/spqeo24.02.218>.
13. Fukunaga K. Introduction to statistical pattern recognition. San Diego : Academic Press, Inc., 1990. 626 p.

Received (Надійшла) 20.01.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.03.2024

APPLICATION OF AN ACTIVE OPTIC-ELECTRONIC SYSTEM AND COMPUTER PROCESSING OF IMAGES FOR THE PURPOSE OF SEARCHING FOR OBJECTS OF INTEREST BY SPECTRAL CHARACTERS

A. Hurin, H. Khudov, O. Maslenko, P. Mynko, Y. Solomonenko

Abstract. The **subject matter** of the article is the method of searching for objects of interest by spectral features based on an active electro-optical system, in which a set of multispectral laser emitters is used as a radiation source, followed by computer processing of the received image. The **goal** is to develop a method of searching for objects of interest using an active optical-electronic system followed by computer processing of the received image. The **tasks** are: consideration of the features of construction and operation of active electro-optical systems with dynamic spectral processing; development of a method of searching for objects by spectral features using an active electro-optical system with computer image processing; development of a mathematical model that allows you to make a decision about the presence of an object of interest by determining the areas of the image with elements that have the highest brightness value. The **methods** used are: methods of digital image processing, methods of mathematical modeling, methods of optimization theory, analytical and empirical methods of image analysis after their digital processing. The following **results** were obtained. Features of construction and operation of active electro-optical systems with dynamic spectral processing are considered. A method of searching for objects by spectral features using an active electro-optical system with computer image processing has been developed. A mathematical model has been developed that allows you to make a decision about the presence of an object of interest by identifying areas of the image with elements that have the highest brightness value. **Conclusions.** The article develops a method that allows you to search for objects by spectral features with an active electro-optical system with computer image processing. A feature of the developed method is the application at the initial stage of an active electro-optical system for measuring the spectral reflectance of the studied area, which is subsequently used, together with the spectral characteristics of the object of interest, in the calculation of the hardware function (filter vector) to ensure an increase in the contrast of the image of the object interest. At the final stage, computer processing of the received image is carried out in order to determine the area where the object of interest is located, based on the elements of the image with the highest brightness value. Mathematical modeling of the developed method of searching for an object of interest in the observation area was carried out. According to the results of mathematical modeling, the decision about the presence of an object of interest was made for the areas whose constituent elements have the highest brightness indicators.

Keywords: active electro-optical system, computer image processing, search for objects in the image.

А. С. Нечаусов, С. І. Горелик, С. М. Андреев, А. В. Лахтіна

Національний аерокосмічний університет “Харківський авіаційний інститут”, Харків, Україна

МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ЗОН ПІШОЇ ДОСТУПНОСТІ УКРИТТІВ ЗАЛЕЖНО ВІД ТИПУ БАЛІСТИЧНИХ СНАРЯДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ГЕОПРОСТОРОВОГО АНАЛІЗУ

Анотація. У статті проведено аналіз покриття зонами пішої доступності укриттів у м. Миколаєві в умовах потенційної небезпеки. Проведено оцінку місткості діючих та потенційних укриттів, на основі якої зроблено висновок про необхідність створення нових укриттів. Розглянуто методи аналізу покриття зонами пішої доступності укриттів в залежності від типу балістичних снарядів на прикладі міста Миколаїв за допомогою сучасних засобів геопросторового аналізу. Запропоновано практичне вирішення проблеми створення зон пішої доступності укриттів залежно від типу балістичних снарядів за допомогою сучасних засобів геопросторового аналізу. **Метою статті** є підвищення ефективності захисту населення в умовах небезпеки, використовуючи сучасні засоби геопросторового аналізу. **Отримані результати:** виявлені основні недоліки існуючої системи забезпечення безпеки та належного інформування населення щодо укриттів у містах, на базі запропонованої методики проведено аналіз загальної ситуації з укриттями в м. Миколаїв, в результаті якого були побудовані картографічні звіти із розрахованими зонами покриття пішої доступності залежно від типу балістичних снарядів, що надає можливість більш ефективно та обґрунтовано оцінювати безпекову ситуацію та приймати управлінські рішення. **Висновки:** у ході практичної реалізації методики на прикладі міста Миколаїв виявлено, що наявні в місті укриття не здатні забезпечити необхідну часову доступність та не мають необхідної місткості для порятунку навіть половини населення вразі наявної необхідності, тому створено рекомендації до визначення потенційних та створення нових укриттів для підвищення безпеки населення.

Ключові слова: зона покриття, снаряд, ArcGIS Online, QGIS, укриття, місткість, піша доступність, зона.

Вступ

Укриття мають велике значення для збереження життів цивільного населення під час сучасної війни. Час польоту снаряду залежить від багатьох факторів, зокрема типу снаряду, його балістичних характеристик, погодних умов та відстані яку він долає. Таким чином, доступність і місткість укриттів є важливими факторами безпеки цивільного населення під час війни. Багато з них, через недбалість та інші фактори, перестали відповідати вимогам щодо забезпечення ними необхідного ступеня захисту. Також, через поганий стан, загальна місткість укриттів для наявного населення є недостатньою. У містах України до сьогодні є багато непрацюючих укриттів, які вважалися придатними до початку повномасштабного вторгнення. За результатами аналізу державних джерел створених для надання інформації населенню щодо укриттів та інших установ цивільного захисту також було виявлено ряд недоліків, які в сукупності пов'язані з відсутністю відповідного аналізу загроз від яких потрібно рятувати населення, відсутністю кількісного розподілення місць призначених на певну кількість населення. Також немає чітко прописаних стандартів безпеки, якими можна було б характеризувати рівень захисту укриттів. Відсутність стандартизації укриттів та певних вимог до їх кількості та доступності для жителів міст, спираючись на демографічні та соціологічні дані, призводитиме до неналежного рівня безпеки населення та, як слідство, до збільшення жертв серед мирного населення.

Виходячи з викладених проблем, надважливими задачами сьогодення є: визначення необхідної кількості укриттів залежно від кількості людей в районах міст з урахуванням доступності існуючих укриттів залежно від типів снарядів, що використовує ворог та

створення аналітичного підґрунтя для органів виконавчої влади щодо пріоритетності облаштування непрацюючих та створення нових укриттів. Задля реалізації поставлених задач запропонована єдина методика (рис. 1) аналізу покриття зонами пішої доступності укриттів залежно від типу балістичних снарядів, яка стане науково-аналітичною основою для стандартизації укриттів та прийняття управлінських рішень щодо модернізації, релокації та створення нових укриттів.

Сучасні засоби ведення війни налічують широку номенклатуру, яка відрізняється технічними характеристиками та характером ураження. Ворог здатен використовувати як один тип збройних систем, так і комбіновані атаки із різними швидкісними характеристиками, дальністю дії снарядів та балістичною траєкторією. Задля демонстрації можливостей створеної методики було розглянуто Місто Миколаїв, розташоване в стратегічно важливому районі, що робить його потенційною мішенню для ракетних ударів.

Метою статті є підвищення ефективності захисту населення в умовах небезпеки, використовуючи сучасні засоби геопросторового аналізу.

Основна частина

Із урахуванням поставленої мети, результатів проведеного аналізу предметної області та програмно-аналітичних засобів для виконання практичних завдань роботи, побудована структурна схема методики аналізу покриття зонами пішої доступності укриттів залежно від типу балістичних снарядів (рис. 1).

На першому етапі відбувається збір даних про кількість і розподілення населення по адміністративним районам і наявність придатних та непридатних, але потенційних, укриттів [1].

На другому етапі відбувається підготовка даних, які включають пошук інформації про укриття,

роботу з атрибутами, а саме даними про місткість і площу укриттів, орієнтовне місце запуску снаряду та час його підльоту, а також конвертування усіх шарів до єдиного формату, наприклад, SHP-файлів [2].

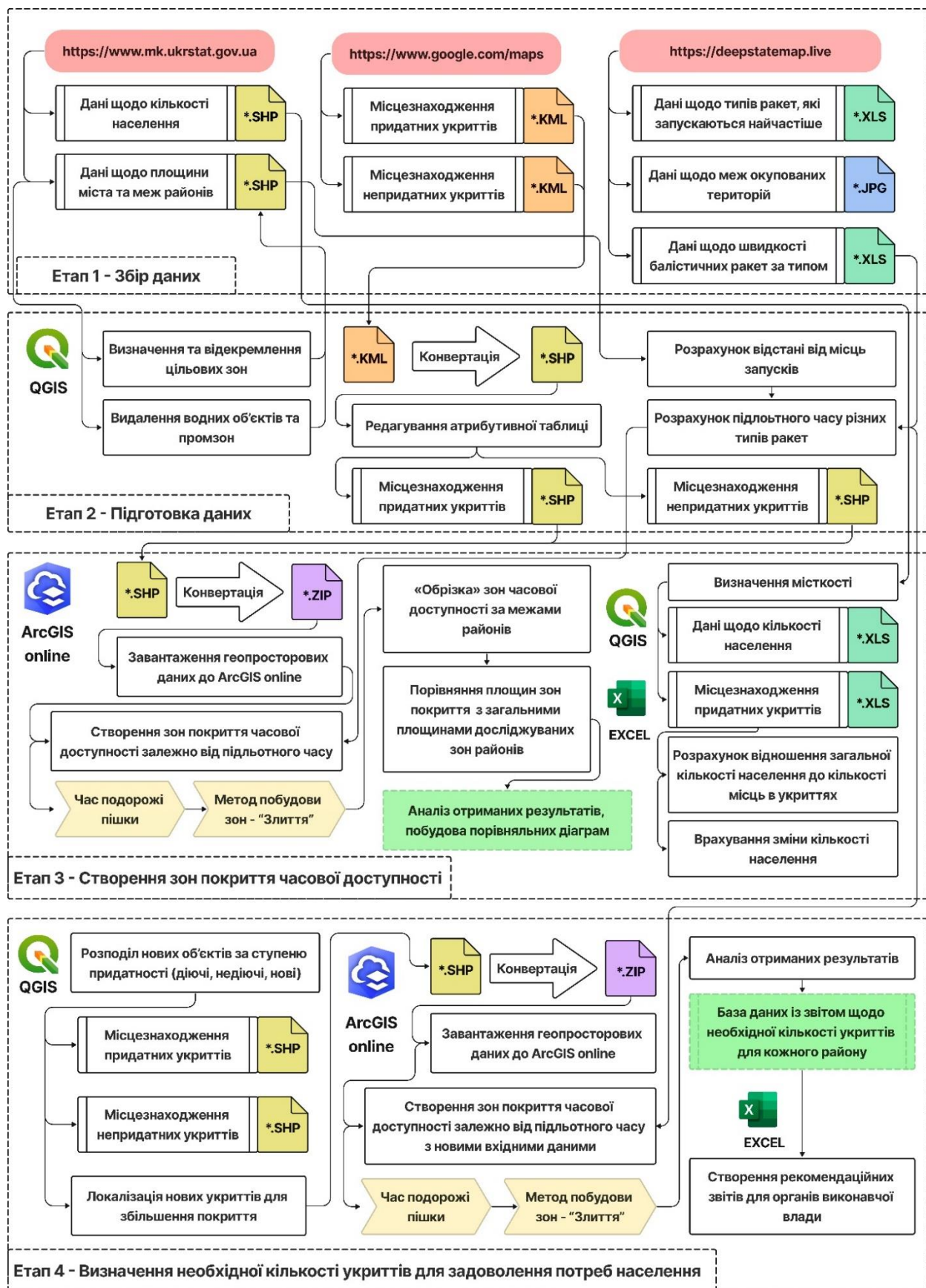


Рис. 1. Схема методики аналізу покриття зонами пішої доступності укриттів в залежності від типу балістичних снарядів за допомогою сучасних засобів геопросторового аналізу

На третьому етапі відбувається створення зон покриття доступності укриттів у залежності від часу підльоту снаряда, порівняння площин зон покриття з загальними площинами районів, розрахунок відношення місць в укриттях до загальної кількості населення району.

На останньому етапі відбувається визначення необхідної кількості укриттів, їх місткості та зонування для забезпечення безпеки населення.

За результатами аналізу технічних можливостей існуючих інструментів геопросторового аналізу, для подальшої роботи в якості програмного забезпечення були обрані: QGIS (Для роботи з файлами та їх конвертації) та ArcGIS Online (для роботи з аналітикою та формуванням звітних картографічних матеріалів).

Аналіз покриття зонами пішої доступності укриттів залежно від типу балістичних снарядів потребує використання сучасних засобів геопросторового аналізу та геоінформаційних систем. Початковою задачею перед побудовою картографічних матеріалів є створення бази даних локацій сховищ у місті Николаїв. З відкритих джерел було отримано шейп-файли з межами міста Николаєва та його районів в якості основи для подальшої обробки. Для того, щоб скористатися геопросторовими аналітичними інструментами для визначення зон, які доступні для пішої евакуації у разі надзвичайних ситуацій, необхідно створити базу даних з підльотним часом ракет з урахуванням географічних характеристик району, приблизних локацій пусків ракет та їх типу.

Знайдені дані про можливі типи балістичних снарядів, які можуть бути використані в загрозах до різних частин міста Николаєва. Для цього, були опрацьовані новинні зведення щодо обстрілів з описом типу ракет, які атакували житлові райони Николаєва від першого дня війни. За результатами аналізу даних були виявлені, найпоширеніші моделі ракет, за допомогою яких завдаються удари по зазначеному місту: Шахеда [3], Калібр-М [4], Калібр-А, Іскандер-М [5], Іскандер-К [6]. Для того, щоб можна було визначити відстань, яку пролітає ракета, для початку було створено полігональний шар з тимчасовою окупованою територією у програмі QGIS в якості джерела інформації використовувався офіцій-

ний сайт DeepState. Також для розрахунку усереднених значень підльотного часу снарядів залежно від їх типу, за результатами аналізу новинних зведень були знайдені усереднені локації запусків на Николаїв окремих типів снарядів з дня початку війни (рис. 2).



Рис. 2. Усереднені локації запусків певних типів снарядів за останні 2 роки за даними ЗМІ

На рис. 3 та в табл. 1 надано результати розрахунків підльотного часу ракет з урахуванням географічних характеристик району, приблизних локацій пусків ракет та їх типу, а саме головних районів – Центральний, Корабельний, Заводський, Інгульський.

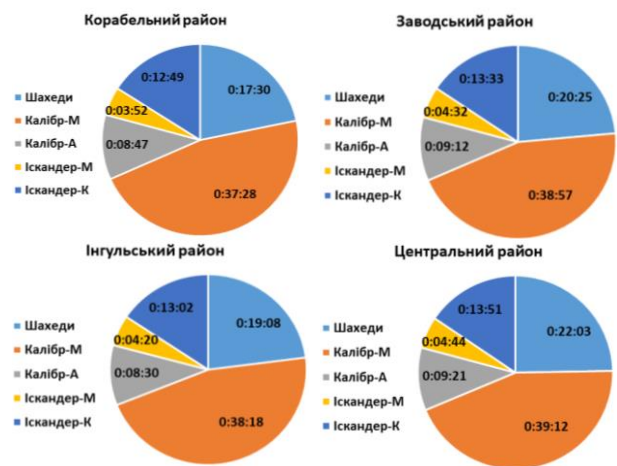


Рис. 3. Порівняльні діаграми підльотного часу залежно від моделі ракети для кожного району Николаїва

Таблиця 1 – Дані щодо підльотного часу різних типів ракет для районів

| Тип | | Шахеда | Калібр-М | Калібр-А | Іскандер-М | Іскандер-К |
|--------------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| Швидкість (км/год) | | 185 | 650 | 860 | 900 | 580 |
| Відстань (км) | Корабельний | 54 | 405 | 126 | 58 | 124 |
| | Заводськи | 63 | 422 | 132 | 68 | 131 |
| | Інгульський | 59 | 415 | 122 | 65 | 126 |
| | Центральний | 68 | 425 | 134 | 71 | 134 |
| Час підльоту | Корабельний | 17 хв. 30 с. | 37 хв. 28 с. | 8 хв. 47 с. | 3 хв. 52 с. | 12 хв. 49 с. |
| | Заводськи | 20 хв. 25 с. | 38 хв. 57 с. | 9 хв. 12 с. | 4 хв. 32 с. | 13 хв. 33 с. |
| | Інгульський | 19 хв. 8 с. | 38 хв. 18 с. | 8 хв. 30 с. | 4 хв. 20 с. | 13 хв. 2 с. |
| | Центральний | 22 хв. 3 с. | 39 хв. 12 с. | 9 хв. 21 с. | 4 хв. 44 с. | 13 хв. 51 с. |

Для аналізу зон покриття пішої доступності до сховищ від ракетної небезпеки залежно від підльотного часу ракет у програмі ArcGIS Online, можна використати геоаналітичні інструменти, що надає ця

платформа [7]. Після того, як було проведено збір географічних даних, таких як точки пуску ракет, розташування сховищ, географічні межі міста та інші важливі шари. Завантажено ці дані в ArcGIS Online та

переходимо до створення нових шарів на основі наданих даних.

Для реалізації поставленої в статті мети був використаний інструмент геопросторового аналізу, вбудований в ArcGIS online «Використовувати наближеність», що має такі можливості: з'єднання джерел з пунктами призначення (вимірює час у дорозі або відстань між парами точок); створення буферів (створює області з однаковою відстанню від об'єктів); створення областей часової доступності (знаходить області навколо місць розташування, яких можна досягти протягом певного періоду часу); пошук найближчих (визначає місця, які знаходяться найближче до відомих місць розташування); планування маршрутів (визначає найкращий шлях для відвідання парком транспортних засобів множини зупинок) [7].

Інструмент «Створення зон часової доступності» створює області, яких можна дістатись в межах визначеного часу поїздки автомобілем, відстані поїздки автомобілем, відстані переміщення пішки і т. д. Цей інструмент виконує вимірювання від однієї або багатьох точок (до 1000) вздовж доріг або пішохідних доріжок та створює шар [8].

Для створення зони були введені всі необхідні параметри для отримання бажаного результату. На першому етапі, буде показаний шар, який взятий як вхідні дані. У другому етапі є різні варіанти налаштування вхідних даних щодо переміщення (легковим автомобілем, вантажним автомобілем або пішки) та параметр (час або відстань), для роботи було використано «Час подорожі пішки». На третьому етапі, необхідно вибрати метод обробки спільних областей з різних вхідних точок, коли вони досягають одна одну, обраний метод злиття, так як, це найкраще покаже зону покриття та дозволить визначити його площу. Останнім етапом, був зроблений запис назви вихідного шару та отримані результати (рис. 4) [9].

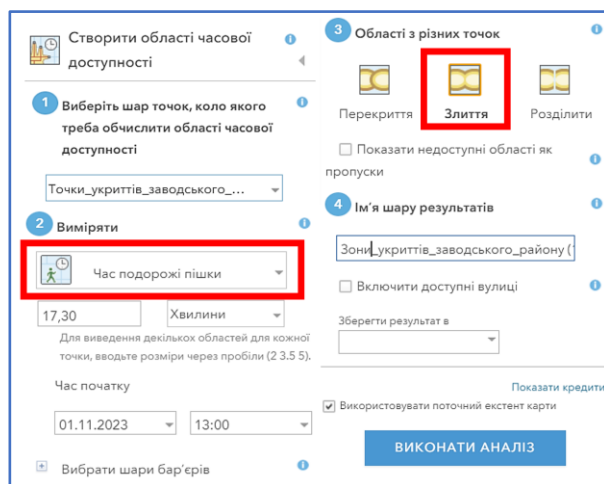


Рис. 4. Вікно налаштування інструменту аналізу зон доступності в ArcGIS online

Далі даний метод, було застосовано для всіх районів та різних типів ракет, у результаті було отримано двадцять полігональних векторних шарів, які відрізнялися своєю зоною покриття. Таким чином, проаналізовано діючі укриття у кожному районі міста

і для типу снаряду «Іскандер-М», який використовується для атак.

На рис. 5-10 представлені результуючі карти зон покриття укриттями м. Миколаїв за типом снаряду «Калібр-А», «Іскандер-К», «Шахед», «Калібр-М» відповідно, з урахуванням діючих укриттів у кожному районі міста [10].



Рис. 5. Результат розрахунку зон покриття Центрального району до укриттів за типом снаряду «Шахед»

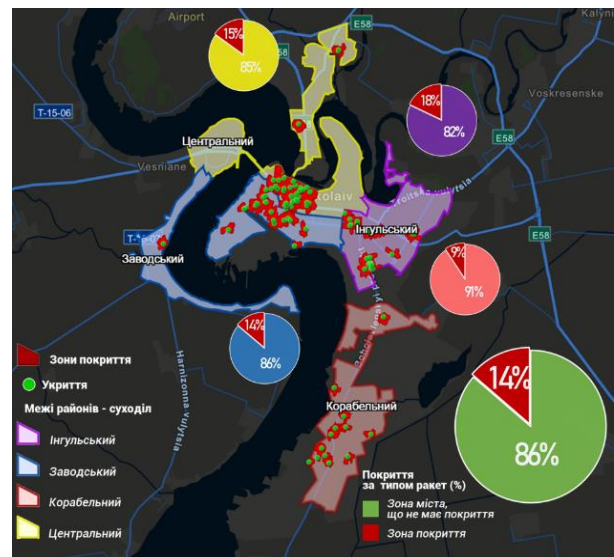


Рис. 6. Результуюча карта зон покриття укриттями м. Миколаїв за типом снаряду «Іскандер-М»

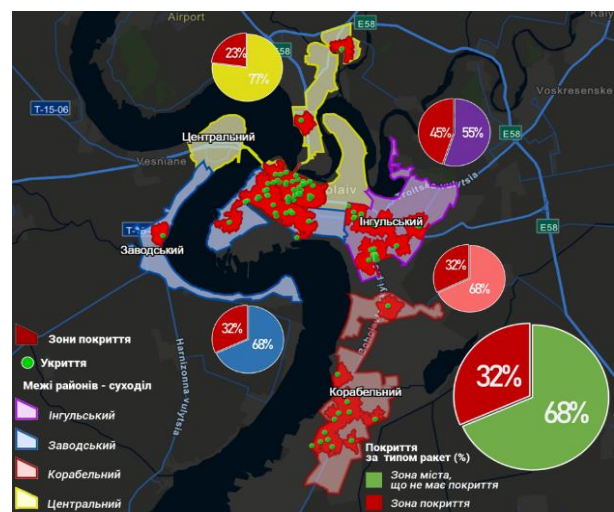


Рис. 7. Результуюча карта зон покриття укриттями м. Миколаїв за типом снаряду «Калібр-А»

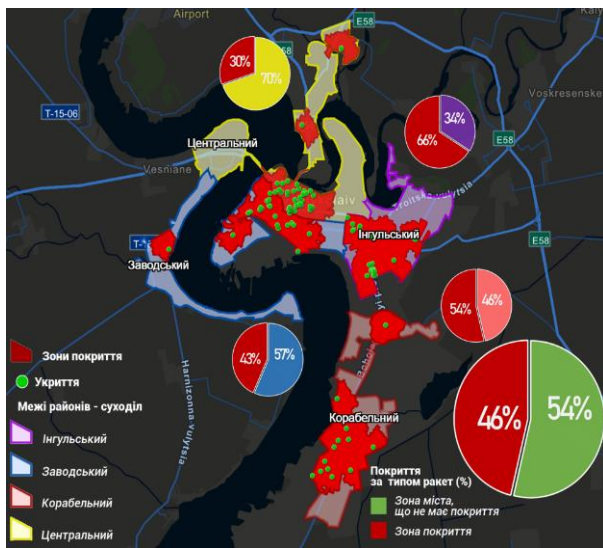


Рис. 8. Результуюча карта зон покриття укриттями м. Миколаїв за типом снаряду «Іскандер-К»

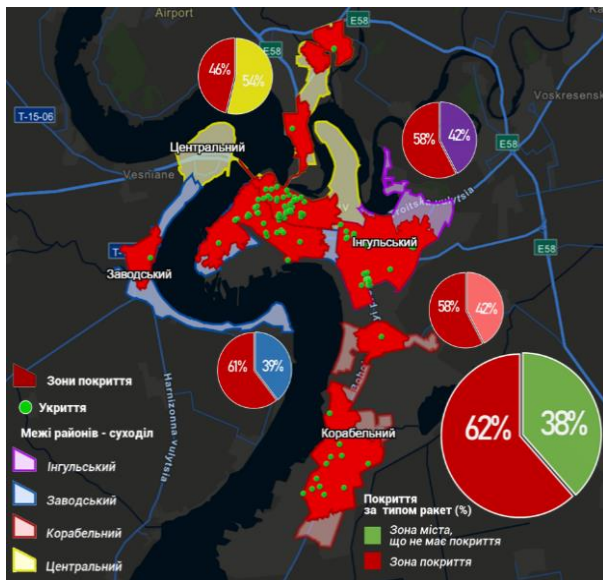


Рис. 9. Результуюча карта зон покриття укриттями м. Миколаїв за типом снаряду «Шахед»

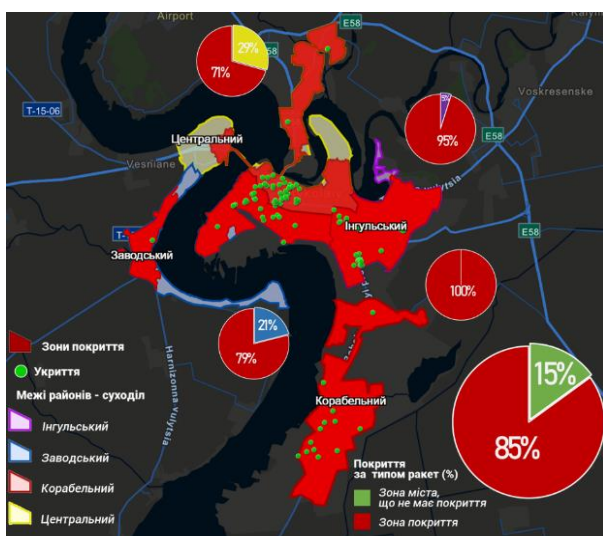


Рис. 10. Результуюча карта зон покриття укриттями м. Миколаїв за типом снаряду «Калібр-М»

У ході аналізу зон покриття з'ясувалося, що часової доступності наявних укриттів недостатньо для забезпечення укриттями всіх жителів міста, а тому було проведено повторний аналіз з урахуванням недіючих укриттів, так як вони в короткий час після ремонтних робіт та переобладнання можуть стати діючими.

Для аналізу зон покриття пішої доступності з урахуванням недіючих сховищ та створення нових із задачею повного покриття району та врахуванням місткості, було застосовано програму QGIS для створення нових точкових векторних шарів. Для того, щоб визначити місця для запроектування нових укриттів, врахувались дані отримані раніше, це області, які перекриваються зонами пішої доступності, тобто зони перекриття.

Також, це дає розуміння щодо зон пропусків, тобто області, які залишаються непокритими. Це дозволило виявити потребу в нових укриттях та оптимізувати існуючі та задіяти укриття, які було занедбані та оновити їх [11].

Було враховано, що для кожного типу ракет в окремих районах зони покриття вийшли різні, а отже окремо для кожної зони покриття побудовано власний шар точок для повного перекриття районів. Для того, щоб перекрити зони у тих районах, де вони недостатні або розташовані далеко, було використані точки непридатних укриттів, які потребують ремонту та створення нових.

Після того, були проставлені нові точки з урахуванням вже наявних зон пішої доступності, було завантажено шар до програми ArcGIS Online та було побудовано нову зону покриття пішої доступності із урахуванням недіючих та нових сховищ. При побудові нової зони покриття було досягнене повне перекриття міста.

При повторному аналізі зон покриття пішої доступності із урахуванням недіючих та нових сховищ було отримані з максимальним перекриттям районів, а результат по найбільшій кількості укриттів представлена на рис. 11, з повним перекриттям зон пішої доступності [12].

Маючи дані щодо необхідної кількості укриттів для забезпечення повного покриття міста, були створені рекомендації для органів виконавчої влади міста із урахуванням результатів аналізу поточної ситуації.

У процесі аналізу були створені карти із доданими необхідними точками укриттів для досягнення найбільшого відсотку покриття для кожного району міста за типом снаряду, що використовується під час атак, а також прораховані діючі та наявні непридатні укриття, що можуть бути переобладнані.

На основі таких даних було прораховано кількість укриттів різного типу для кожного району міста.

У табл. 2 представлена необхідна кількість укриттів для кожного району для того, щоб зробити максимальну зону покриття районів, враховуючи різні типи снарядів.

В табл. 3 представлені дані щодо місткості укриттів з різними вхідними даними по районам міста.

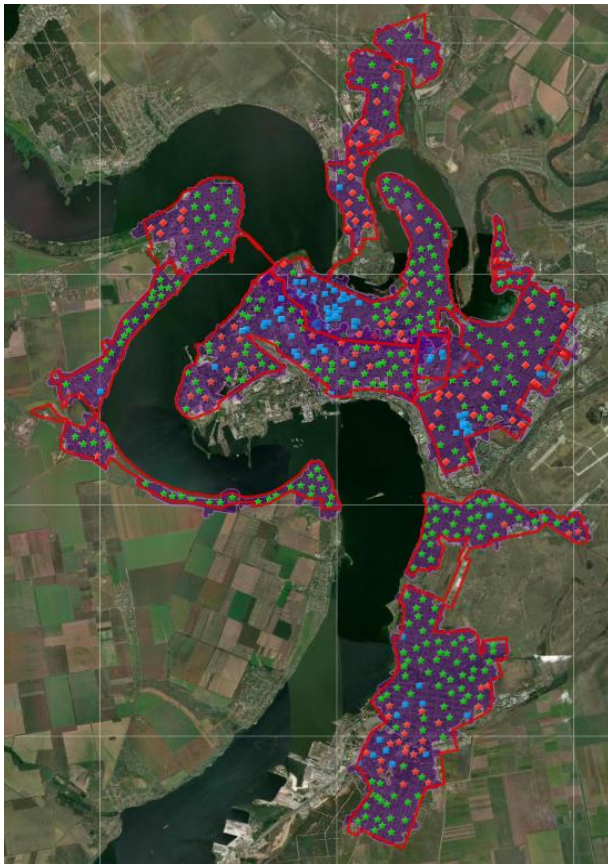


Рис. 11. Зона покриття укриттями м. Миколаїв за типом снаряду «Іскандер-М» з урахуванням діючих, непридатних та нових укриттів

За даними відображеними в таблиці, місткість діючих укриттів катастрофічно мала порівняно з загальною кількістю населення. При розрахунках місткості щодо непридатних укриттів було отримано 15 % розміщення населення, що майже втричі більше, ніж було раніше.

Дана місткість все одно погано перекриває потреби населення, але якщо запроєктувати нові укриття, то можна побачити результат, що вони перекривають таку ж кількість населення як діючі та непридатні разом. Отже, загальна місткість з урахуванням діючих, непридатних та нових укриттів становить майже половину населення міста. Підвищення місткості укриттів за рахунок існуючих та нових допомагає зберегти соціальну стабільність та є важливою складовою стратегії захисту населення в умовах надзвичайних ситуацій.

Висновки

Аналіз покриття зонами пішої доступності укриттів у м. Миколаєві в умовах потенційної небезпеки показав, що існує ряд проблем, які потребують негайного вирішення. Для забезпечення належного рівня захисту населення необхідно створити нові укриття, провести ремонт та модернізацію непридатних укриттів, а також підвищити рівень інформованості населення про розташування укриттів.

Розроблена методика аналізу покриття зонами пішої доступності укриттів залежно від типу балістичних снарядів базується на сучасних засобах геопросторового аналізу.

Таблиця 2 – База даних щодо необхідної кількості укриттів для кожного району

| Райони | | Центральний | Інгульський | Заводський | Корабельний | Загалом |
|------------------------|--------------------|-------------|-------------|------------|-------------|---------|
| Діячі укриття | | 40 | 26 | 21 | 13 | 100 |
| Калібр-М (37-39 хв.) | Непридатні укриття | 3 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| | Нові укриття | 0 | 0 | 3 | 0 | 3 |
| Шахіди (17-22 хв.) | Непридатні укриття | 8 | 3 | 7 | 1 | 19 |
| | Нові укриття | 3 | 1 | 4 | 3 | 11 |
| Іскандер-К (12-13 хв.) | Непридатні укриття | 13 | 7 | 12 | 3 | 35 |
| | Нові укриття | 19 | 4 | 15 | 6 | 44 |
| Калібр-А (8-9 хв.) | Непридатні укриття | 21 | 16 | 15 | 6 | 58 |
| | Нові укриття | 24 | 13 | 39 | 26 | 102 |
| Іскандер-М (3-4 хв.) | Непридатні укриття | 40 | 30 | 25 | 25 | 120 |
| | Нові укриття | 71 | 26 | 89 | 102 | 288 |

Таблиця 3 – База даних щодо місткості з урахуванням діючих, непридатних та нових укриттів

| Назва району | Центральний | Інгульський | Заводський | Корабельний | Загалом |
|---|-------------|-------------|------------|-------------|---------|
| Кількість населення | 117719 | 109743 | 101476 | 61622 | 390560 |
| Місткість діючих укриттів | 5779 | 6358 | 5237 | 7259 | 24633 |
| Розміщення населення в укриттях, % | 4,909 | 5,793 | 5,16 | 11,77 | 6,3 |
| Місткість непридатних укриттів | 22868 | 14659 | 11212 | 9877 | 58616 |
| Розміщення населення в укриттях, % | 19,42 | 13,35 | 11,04 | 16,02 | 15,008 |
| Місткість нових укриттів | 28400 | 20800 | 26700 | 15300 | 91200 |
| Відсоток розміщення населення в укриттях, % | 24,12 | 18,95 | 26,31 | 24,821 | 23,35 |
| Загальна місткість з урахуванням діючих, непридатних та нових укриттів, % | | | | | 44,65 |

Також розроблена методика використовує та адаптує існуючі інструменти та методи геоінформаційних технологій та програмних продуктів для цифрової картографії та моделювання для конкретних завдань сучасності. Зони часової доступності розраховувались за допомогою новітніх інструментів аналізу логістичних міських мереж доріг, що дозволяє доволі точно визначити зони міста, в яких укриття знаходяться далеко від людей, або їх недостатньо.

Практична реалізація методики доводить доцільність підходу, в якому ключовим фактором задля побудови оптимальної інфраструктури споруд призначених для захисту населення є їх доступність для цього населення в рамках встановленого часу залежно від типів балістичних снарядів, що використовує ворог. Час підльоту вказує на те які частини міста будуть атаковані першими, що дозволило ідентифіку-

вати зони найвищого ризику. Застосування такого підходу разом із сучасними засобами геопросторового аналізу дозволить значно покращити ефективність заходів захисту населення в умовах потенційної небезпеки.

За результатами побудованих зон покриття міста з урахуванням типу балістичних ракет з 14-85% до 100 % перекриття за рахунок збільшення кількості укриттів в необхідних частинах районів. Результати аналізу вказали на те що укриттів недостатньо, а більшість з них перебуває у непридатному стані. Це вимагає негайного залучення додаткових ресурсів для модернізації старих та створення нових, більш ефективних укриттів, щоб забезпечити адекватний загальний рівень місткості укриттів задля захисту населення в умовах потенційної небезпеки через масовані обстріли.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ржеутська Л. Укриття: чи можна покращити ситуацію ще під час війни? – DW – 26.08.2022. dw.com. URL: <https://www.dw.com/uk/ukritta-i-bomboshovisa-ak-v-ukraini-vpravlout-pomilki-dovoennogo-casu/a-62923685>
2. Вирішення проблеми з укриттями по-миkolaївські: спочатку включити до «карти укриттів» майже 400 підвалів, а потім їх викреслити | Inshe.tv. inshe.tv. URL: <https://inshe.tv/mykolayv/2023-08-30/790389>
3. Гучні та непомітні для ППО: на що здатні дрони-камікадзе Shahed-136. ФАКТИ ICTV. URL: <https://fakty.com.ua/ua/ukraine/suspilstvo/20230928-guchni-ta-nepomitni-dlya-ppo-na-shho-zdatni-drony-kamikadze-shahed-136>
4. Ракети Калібр: характеристики снарядів, які росіяни випускають по Україні. Vikna. URL: <https://vikna.tv/dlia-tebe/bezpeka/rakety-kalibr-harakterystyky/#:~:text=до%>
5. С. Морфінов Іскандери: російське wunderwaffe, яким вони обстрілюють Україну. BBC Україна URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/articles/cgrmym7eqm8o>
6. А. Одінцова По Краматорську вдарили Іскандерами. Що це за комплекси і в чому різниця між їхніми балістичними та крилатими ракетами. New Voice. URL: <https://nv.ua/ukr/ukraine/events/raketi-iskander-harakteristiki-vidi-zona-urazhennya-balistichnih-raket-iskander-yaki-zastosuvala-rf-50327983.html>
7. ArcGIS Online - Web-based GIS Mapping Software | Esri UK. GIS Software, Spatial Analytics & Location Intelligence | Esri UK. URL: <https://www.esriuk.com/en-gb/arcgis/products/arcgis-online/overview> (дата звернення: 14.12.2023).
8. ArcGIS Online - Swarthmore College ITS Blog. Swarthmore College ITS Blog. URL: <https://blogs.swarthmore.edu/its/2020/04/16/arcgis-online/>
9. Danshyna S.Yu., Nechausov A.S. Solution of the problem of placing medical facilities in city development projects / Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2020. – № 3 (54). – P. 138–149. DOI 10.15588/1607-3274-2020-3-13
10. Danshyna S. Yu., Nechausov A. S. Method of information technology for structure analysis of urban network fire-rescue units – Radioelectronic and computer systems. – 2023. – № 4(108). – P. 171 – 183.
11. QGIS. Welcome to the QGIS project!. URL: <https://qgis.org/uk/site/about/index.html>
12. Perform analysis (Map Viewer Classic) | Esri UK. URL: <https://doc.arcgis.com/en/arcgis-online/analyze/perform-analysis.htm>

Received (Надійшла) 22.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.04.2024

Methodology for analyzing the areas of walking accessibility of shelters depending on the type of ballistic missiles using modern geospatial analysis tools

A. Nechausov, S. Horelyk, S. Andreev, A. Lakhtina

Abstract. The article analyses the coverage of the walking distance of shelters in Mykolaiv city under conditions of potential danger. The capacity of existing and potential shelters was assessed, on the basis of which a conclusion was made about the need to create new shelters. The article considers methods of analysing the coverage of the walking distance of shelters depending on the type of ballistic shells on the example of the city of Mykolaiv using modern geospatial analysis tools. A practical solution to the problem of creating zones of walking accessibility of shelters depending on the type of ballistic projectiles using modern geospatial analysis tools is proposed. **The purpose** of the article is to increase the effectiveness of protection of the population in conditions of danger using modern means of geospatial analysis. **Results:** the main shortcomings of the existing system of ensuring security and proper informing of the population about shelters in cities were identified, the general situation with shelters in Mykolaiv city was analysed on the basis of the proposed methodology, which resulted in the construction of cartographic reports with calculated areas of coverage of walking distance depending on the type of ballistic missiles, which makes it possible to more effectively and reasonably assess the security situation and make management decisions. **Conclusions:** in the course of practical implementation of the methodology on the example of the city of Mykolaiv, it was found that the existing shelters in the city are not able to provide the necessary time accessibility and do not have the necessary capacity to save even half of the population in case of emergency, therefore, recommendations for identifying potential and creating new shelters to improve the safety of the population were created.

Keywords: coverage area, shell, ArcGIS Online, QGIS, shelter, capacity, walking distance, zone.

Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 629.5.078:656.075

doi: 10.26906/SUNZ.2024.2.018

А. І. Головань

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ АДАПТИВІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЗМІНИ СТАНУ СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

Анотація. У статті розглянуто важливу проблему оптимізації системи технічного обслуговування суднових технічних засобів з врахуванням їхнього зношення, поточного та прогнозованого стану. Аналіз останніх досліджень і публікацій в цій області вказує на необхідність розробки адаптивних стратегій обслуговування, спрямованих на ефективне використання ресурсів та підвищення надійності суднових систем. Метою статті є дослідження процесів адаптивізації системи технічного обслуговування за результатами зміни стану суднових технічних засобів та розробка практичних рекомендацій щодо оптимізації цих процесів. Результати статті включають дослідження процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування внаслідок одного процесу зміни технічного стану. Автор розглядає методику визначення відносної періодичності технічного обслуговування для визначення робочих точок системи. Зокрема, в статті розглядається вплив зміни технічного стану на витрати та оптимізацію процесів обслуговування. Результати дослідження дозволяють визначити оптимальні, за витратами і часом, стратегії обслуговування з урахуванням зношення та несправностей технічних засобів судна. Висновки підкреслюють важливість розвитку адаптивних підходів до технічного обслуговування суднових систем, що дозволить забезпечити їхню ефективну експлуатацію та підвищити загальну продуктивність морського транспорту.

Ключові слова: адаптивізація, технічне обслуговування, вантажні судна, зміна технічного стану, ефективність, витрати обслуговування, аналіз.

Вступ

Постановка проблеми. У контексті морського транспорту та судноплавства, ефективне технічне обслуговування суднових систем визначає не лише безпеку плавання, але й оптимальну експлуатацію та економічність судноплавного процесу. Однак, в умовах постійної зміни стану технічних засобів суден, традиційні методи обслуговування (за відмовами, регламентний та за станом) можуть виявитися недостатньо ефективними.

Однією з ключових проблем управління технічним обслуговуванням суднових систем є необхідність адаптувати процеси обслуговування до актуального стану обладнання. Традиційні регламентні підходи до технічного обслуговування, що ґрунтуються на фіксованих інтервалах обслуговування, не завжди враховують індивідуальні особливості та потреби суднових систем у ремонті та заміні деталей. Тому, актуальним стає питання розробки та впровадження адаптивних стратегій технічного обслуговування, які базуються не лише на поточному стані обладнання, а й на адаптивізації плану технічного обслуговування у відповідності до прогнозованої зміни цього стану. Це вимагає системного аналізу даних про стан обладнання, розробки алгоритмів адаптації технічного обслуговування до змінного стану суднових систем, а також ефективного використання сучасних технологій та методів моделювання для оптимізації цих процесів.

Основною проблемою, яку вирішує дана стаття, є розробка та дослідження процесів адаптивізації системи технічного обслуговування суднових технічних

засобів з метою підвищення ефективності функціонування суден та зменшення експлуатаційних витрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій вказує на важливість наукового обґрунтування змін параметрів системи технічного обслуговування технічних засобів вантажних суден. Важливими постають питання: виявлення впливу зміни стану на параметри технічного обслуговування суднових механізмів є критично важливим питанням, що має потенційні наслідки для виходу з ладу обладнання, екологічної безпеки та економічних втрат [1]. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано прогнозну модель технічного обслуговування з використанням штучного інтелекту та даних моніторингу в реальному часі [2]. Ця модель може допомогти визначити ключові параметри та потенційні несправності, що уможливило розробку адаптивних стратегій технічного обслуговування. Також рекомендується використовувати підходи до технічного обслуговування на основі стану, що підтримуються управлінням надійністю та ризиками [3]. Крім того, оцінка дестабілізуючих факторів суднових технічних засобів, наприклад факторів у валу головного двигуна може сприяти розробці систем прийняття рішень для компенсації цих впливів [4]. Запропонований напівкількісний метод є більш надійним підходом для вибору стратегій технічного обслуговування суднових машинних систем. [5]. Нова, у час свого появи, методологія поєднує підхід до ризиків і критичності та демонструє з використанням інструментів аналізу режимів, наслідків і критичності відмов (FMESA) та аналізу дерева несправностей (Fault Tree

Analysis) [6]. Запропонована стратегія технічного обслуговування за станом дозволяє мінімізувати загальні витрати, а також вплив на навколишнє середовище [7]. Успіх технічного обслуговування на основі стану залежить від здатності розробляти ефективні моделі прогнозування [8]. У цій статті представлено адаптивну політику технічного обслуговування для систем, що зношуються, з урахуванням як позитивних, так і негативних наслідків, для оптимізації розподілу витрат на технічне обслуговування та порогових значень при збереженні життєвого циклу системи [9]. Очікується, що майбутнє суднових машинних систем буде за технічним обслуговуванням на основі стану, причому більш ефективне управління буде досягнуто за рахунок моніторингу продуктивності та надійності системи [10].

Всі ці дослідження разом підкреслюють важливість розробки та впровадження адаптивних стратегій технічного обслуговування для суднових механізмів. У майбутньому, такий підхід до технічного обслуговування обіцяє бути стандартом в судноплаванні, що дозволить досягти більшої ефективності та надійності суднових механізмів.

Мета статті полягає в дослідженні та аналізі процесів адаптивізації системи технічного обслуговування на основі зміни стану суднових технічних засобів.

Основний матеріал

Задача адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування принципово вирішується за допомогою вибору, для реалізації в рамках цифрової стратегії, одного з таких критеріїв:

- Мінімізації відносних витрат часу на усунення відмов або на знаходження в стані технічного обслуговування (знаходження максимуму коефіцієнта технічного використання);
- Мінімізації сумарних витрат на технічне обслуговування (критерій ефективності використання ресурсів);
- Максимальна потрібність в технічному обслуговуванні об'єкта, що зберіг працездатність (критерій – потрібності в ТО).

Варто підкреслити, що задачу адаптивізації параметрів необхідно аналізувати у контексті управління параметрами використовуваної системи технічного обслуговування та її оптимізації через перехід до більш ефективного методу технічного обслуговування. Оптимізаційні процеси мають проводитись з урахуванням допустимих ризиків і відповідно до принципу ALARP (as low as reasonably practicable), що передбачає мінімізацію ризиків до рівня, коли подальше їх зниження стає нераціональним.

Безсумнівно, формування системи технічного обслуговування, яка забезпечить мінімальні витрати, є не зовсім коректною постановкою задачі. Важливою умовою розв'язання цієї задачі є віднесення до витрат на технічне обслуговування не тільки планових витрат, а й непланових, включно з можливою втраченою вигодою в разі відмови обладнання. Таким чином, адаптивізація процесів технічного обслуговування трансформується у безперервну оптимізацію процесів управління відмовами. Визначення запланованих витрат

на технічне обслуговування зазвичай не становить особливих труднощів, за винятком витрат на заміну деталей. Більшість номенклатури змінних частин замінюється при досягненні незадовільного стану, а не за принципом профілактичної заміни (підшипники газотурбонагнітача, тонкостінні підшипники двигунів внутрішнього згорання). Заводи виробники не прагнуть довести до відома експлуатаційників очікувані ресурси більшості, особливо дорогих деталей. Отже, прогнозування потреби в запасних частинах зазвичай здійснюється на підставі попереднього досвіду чи аналізу надійності. Наприклад, у системі річкового транспорту України існували стандарти витрати деталей двигунів внутрішнього згорання для групи десяти однакових двигунів за певний період експлуатації. Втрати, асоційовані з відмовами, представляють собою ще більш невизначений параметр.

Часові витрати на непланове технічне обслуговування можуть бути оцінені з певним ступенем достовірності за допомогою аналізу наслідків відмов, в тому числі на основі даних про експлуатацію. Водночас, визначення часових і, зокрема, фінансових витрат на ліквідацію відмов, які призводять до простою транспортного засобу, становить більш складну задачу. Зазвичай, більшість відмов, що спричиняють простій судна, є результатом непередбачуваного співпадіння різних випадкових подій, причому усунення хоча б однієї з цих подій може перервати цю послідовність і запобігти простою.

Такий шлях, заснований на аналізі повних витрат на технічне обслуговування, видається найбільш перспективнішим, хоча його реалізація потребує впровадження системи для всебічного обліку витрат. Існують системи обліку витрат, такі як MOSyS, AMOS, CoCoS, shipmonitoring.org, проте лише MOSyS та shipmonitoring.org передбачають систематичний аналіз операційної діяльності, на відміну від інших зазначених інформаційних систем.

Крім того, в багатьох судноплавних компаніях старші механіки суден навіть не мають доступу до інформації щодо фактичних витрат компанії, як на усунення відмов, так і на планові потреби, що, на думку автора дослідження, є необґрунтованим. У зв'язку з частковою закритістю такої інформації будь-які розробки в області витратної оптимізації повинні бути спрямовані на загальне використання, а не вирішення окремих проблем. Компанія повинна самостійно вирішувати, як використовувати отримані результати, враховуючи особливості своєї діяльності.

1. Дослідження процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами одного процесу зміни технічного стану. З метою забезпечення процесів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрової стратегії технічного обслуговування суднових технічних засобів досліджувались процеси адаптивізації параметрів обслуговування суднового дизель-генератора на основі аналізу та прогнозування зміни їх технічного стану.

Програма експериментального дослідження зміни стану масляних кілець суднового дизель-генератора включала в себе наступні етапи:

1. Постановка завдання. Визначення об'єкта дослідження (масляні кіліця суднового дизель-генератора). Формулювання завдання: розробка процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування на основі аналізу процесів зміни технічного стану.

2. Збір даних. Встановлення сенсорів та засобів моніторингу для збору даних про роботу масляних кілець суднового дизель-генератора. Запуск системи збору даних та запису інформації про роботу масляних кілець.

3. Підготовка даних. Обробка та фільтрація зібраних даних. Визначення ключових параметрів для аналізу стану масляних кілець.

4. Аналіз процесів зміни технічного стану. Визначення залежностей між параметрами та станом масляних кілець. Виявлення змін у технічному стані та їх причин.

5. Розробка процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування. Визначення стратегій зміни параметрів обслуговування на основі результатів аналізу.

6. Тестування та оцінка ефективності. Тестування розроблених процесів на практиці. Оцінка ефективності нової системи технічного обслуговування.

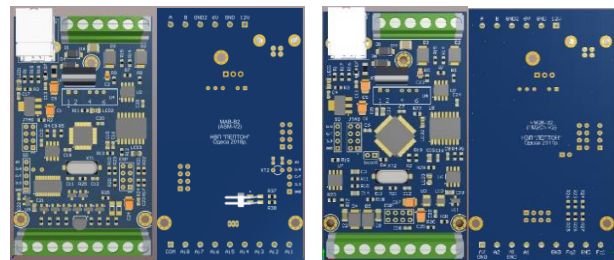
2. **Експериментальні установки для дослідження процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами процесів зміни технічного стану.** Дослідження процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами процесів зміни технічного стану були використані пристрої для збору, аналізу та інтерпретації даних про роботу обслуговуваного обладнання. Вони складаються зі зв'язаних між собою частин і систем: сенсорів для моніторингу параметрів технічного стану, аналітичного програмного забезпечення для обробки та аналізу даних, а також інтегрованих систем збору даних та алгоритмів адаптивного управління. Вимірювальна система містить у собі сенсори для вимірювання різних параметрів роботи обладнання, таких як температура, тиск, оберти, вібрація та інші фізичні величини, які дозволяють визначати стан технічного обладнання та вживати відповідних заходів для підтримки його ефективності. Експериментальна установка для проведення наукового дослідження над двигуном суднового дизель-генератора, заснована на вимірюванні і подальшому аналізі швидкостей зношування кілець, циліндрової втулки, зміни тиску та витрати палива і масла та складається із таких складових.

Дизель-генератор (рис. 1). Основною складовою експериментальної установки є судновий дизель-генератор, який служить об'єктом дослідження.

Датчики та вимірювальне обладнання. Для вимірювання швидкостей зношування кілець, циліндрової втулки, зміни тиску та витрати палива і масла проводяться відповідні інструментальні вимірювання. Додатково встановлено вимірювачі (рис. 2, ілюструє 3D візуалізацію плати пристрою спроектованої автором статті у середовищі Altium Designer 18), датчики тиску, температури, витрати палива і масла, а також вимірювачі вібрації підключені за схемою на рис. 3.



Рис. 1. Судновий дизель-генератор



а б

Рис. 2. Пристрої: а – реєстрації аналогових сигналів; б – обчислювач частоти сигналу

Дані та система збору. Отримані від датчиків дані про тиск, температури, витрати палива і масла, а також вимірювачі вібрації та вимірювання швидкості зношування і параметри роботи двигуна збираються системою збору даних ACMS, комп'ютерна система з відповідним програмним забезпеченням для збору, збереження і обробки отриманих даних.

Аналізатори та інструменти аналізу. Для подальшого аналізу даних використовуються спеціалізовані аналізатори та інструменти аналізу ShipDiMRO. Такі, як програмні засоби для статистичного аналізу, машинного навчання та моделювання, які дозволяють встановити взаємозв'язки між параметрами двигуна і швидкістю зношування його складових.

Контрольна система. Для забезпечення надійності та безпеки експерименту встановлена контрольна система, яка виконує функції моніторингу роботи установки та автоматично виконує заходи сигналізації в разі виявлення аномалій або перевищення допустимих значень параметрів.

Описана установка дозволяє проводити експерименти для адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування на основі результатів процесів зміни технічного стану суднового дизель-генератора.

3. **Результати дослідження процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами одного процесу зміни технічного стану.** Цей приклад є найпростішим, тому що ідеалізується система процесів, які інтерпретуються як один або обирається один як такий, що визначає потребу в технічному обслуговуванні.

System's "ShipMonitoring" layout on the ship

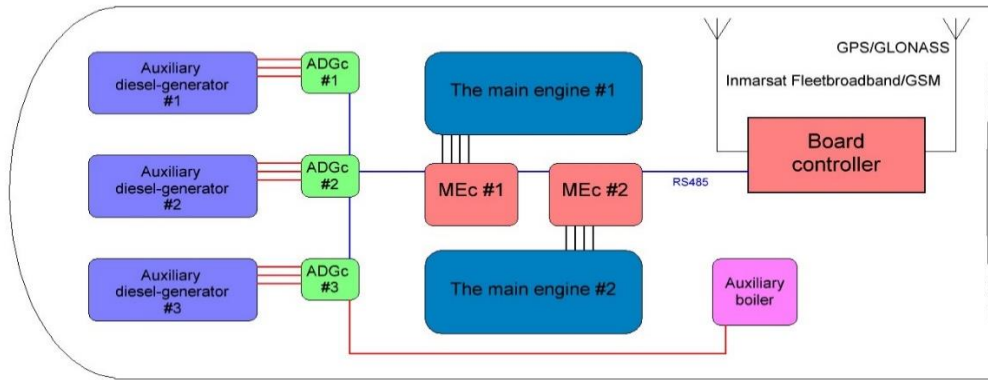


Рис. 3. Схема підключення блоку накопичення даних системи АСМС – моніторингу технічного стану суднових технічних засобів

Відомо, що для допоміжних двигунів необхідність проведення моточистки значною мірою визначається зносом формуючої масляних кілець, унаслідок чого ефективність їхньої роботи падає, що призводить до значного збільшення витрат масла. Знос формуючої кільця призводить до збільшення зазору в замку за формулою: $\Delta\delta = 2\pi \cdot \Delta d$, де Δd – середня зміна ширини масляного кільця в середньому інтервалі між регламентними моточистками Δt_{reg} , коли безпосередньо контролювали зміну зазорів у замках $\Delta\delta$. За експериментальними даними у процесі експлуатації було отримано значення $\Delta d = 0.44$ мм, при $\Delta t_{reg} = 6100$ годин, $\Delta\delta = 2 \cdot \pi \cdot 0.44 = 2.76$ мм.

У безрозмірних одиницях середня швидкість зміни технічного стану вузла визначиться як

$$\gamma_i = \frac{\Delta u_i}{\Delta t_{reg}} = \frac{1}{\Delta t_{reg}} \cdot \frac{\Delta\delta}{\delta_{lim} - \delta_{set}} \quad (1)$$

де установчий зазор $\delta_{set} = 1.15$ мм, а граничний зазор $\delta_{lim} = 4$ мм. Розрахуємо швидкість зміни технічного стану за формулою (1) $\gamma_i = 1/6100 \cdot 2.76/(4 - 1.15) = 0.159$ тис. год⁻¹. При цьому коефіцієнт варіації швидкості зміни технічного стану становив ($V_v = 0.4$). Середнє напрацювання до досягнення гранично допустимого значення зазору в замку (4 мм) унаслідок лінійного прогнозу зміни зазору або фактичних даних за вимірами під час моточистки складало ($T_m = 7900$) годин.

Для того, щоб скористатися розрахунковими кривими параметрів для визначення робочих точок системи технічного обслуговування, необхідно визначити відносну періодичність регламентного технічного обслуговування:

$$\Delta T_{reg} = \frac{\Delta t_{reg}}{T_m} \quad (2)$$

За формулою (2) розрахуємо відносну періодичність технічного обслуговування:

$$\Delta T_{reg} = 6100/7900 = 0.772.$$

Використовуючи поліноміальну залежність результатів відпрацювання циклів експлуатації вантажного судна, представлену у [11] для регламентного методу за встановленої відносної періодичності технічного обслуговування ($\Delta T_{reg} = 0.772$) для

коефіцієнта варіації ($V_v = 0.4$) визначимо ймовірність запобігання досягненню граничного стану регламентною системою ТО ($P_{pre} = 0.5518$), тривалість циклу експлуатації ($T_{cycle} = 0.699$) та залишковий ресурс за зміною стану масляних кілець ($R_{res} = 0.321$).

Трудомісткість планових моточисток двигуна становить ($H_{sch} = 240$ люд. год). Якщо моточистка двигуна виконується в результаті досягнення граничного стану, збільшення трудомісткості оцінюється у 20%, тобто ($k = 1.2$).

Визначимо функцію витрат на виконання регламентного технічного обслуговування:

$$w = P_{pre} \cdot (1 - k) + k \quad (3)$$

За формулою (3) розрахуємо функцію витрат $w = 0.5518 \cdot (1 - 1.2) + 1.2 = 1.08964$.

Витрати віднесені до тривалості циклу експлуатації:

$$Y_{reg} = w/T_{cycle} \quad (4)$$

дорівнюють: $Y_{reg} = 1.08964/0.699 = 1.55886$.

Виражені в абсолютних одиницях витрати на виконання моточисток без урахування витрат на запасні частини становитимуть:

$$\frac{S_{reg}}{T_{cycle}} = \frac{Y_{reg} \cdot S_{sch}}{T_m} = \frac{Y_{reg} \cdot H_{sch} \cdot q \cdot 10^3}{T_m} \quad (5)$$

де годинна ставка виконавців робіт встановлена в компанії ($q = 10$ дол. США/тис. год). За формулою (5) визначимо:

$$\frac{S_{reg}}{T_{cycle}} = \frac{1.55886 \cdot 240 \cdot 10 \cdot 10^3}{7900} = 473.58 \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}$$

Слід звернути увагу на відмінність отриманої величини витрат порівняно з величиною, що не враховує можливість виконання моточистки при досягненні граничного стану:

$$\frac{S_{reg}}{T_{cycle}} = \frac{H_{sch} \cdot q \cdot 10^3}{\Delta t_{reg}} \quad (6)$$

За формулою (6) визначимо:

$$\frac{S_{reg}}{T_{cycle}} = \frac{240 \cdot 10 \cdot 10^3}{6100} = 393.44 \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}$$

Слід зазначити, що прийняття збільшувального коефіцієнта ($k = 1.2$) до витрат на виконання робіт

унаслідок досягнення двигуном граничного стану, є заниженим. Це особливо справедливо, якщо двигун головний, що визначає провізну здатність судна. Витрати на придбання комплексу поршневих кілець для виконання моточистки становлять $s_2 = 500$ дол. США, проте з огляду на те, що замінні поршневі кільця мають залишковий ресурс ($R_{res} = 0.321$) фактичні витрати на змінно-запасні частини становитимуть:

$$S_{sp} = (1 + R_{res}) \cdot s_2. \quad (7)$$

За формулою (7) визначимо:

$$S_{sp} = (1 + 0.321) \cdot 500 = 660.5 \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}$$

Отримана величина витрат може бути уточнена підстановкою залишкових ресурсів для кожної із замінних деталей. Крім того, в цьому разі не враховували витрати довговічніших деталей, тобто тих, що замінюються через дві, три тощо моточистки – у цьому разі витрати на їхнє придбання з урахуванням залишкових ресурсів розподіляються на всі попередні операції технічного обслуговування. Витрати на змінно-запасні частини, віднесені до напрацювання, визначаються за формулою:

$$\frac{S_{sp}}{t} = \frac{1 \cdot 10^3}{T_{cycle} \cdot T_m} \sum_{i=1}^n s_i. \quad (8)$$

За формулою (8) визначимо:

$$\frac{S_{sp}}{t} = \frac{1 \cdot 10^3}{0.699 \cdot 7900} \cdot 660.5 = 124.97 \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}$$

Таким чином сумарні витрати на виконання технічного обслуговування становлять:

$$473.58 + 124.97 = 598.55 \text{ дол. США/тис. год.}$$

Якщо перейти на ТО за станом за допомогою застосування контролю стану циліндрів двигуна за допомогою пневматичного індикатора, обліку витрати мастила на дизель, то прогнозовані витрати можуть істотно змінитися. Якщо, як і раніше, забезпечувати таку саму ймовірність запобігання досягненню граничного стану ($P_{pre} = 0.5518$), але виконувати чотири контрольні операції між моточистками, інтервал між якими може бути збільшено до $T_{cycle} = 0.92$ або в абсолютних одиницях $\Delta t_{reg} = 0.92 \cdot 7900 = 7268 \approx 7300$ годин. При цьому залишковий ресурс становитиме ($R_{res} = 0.24$). Крім того, якщо передбачити вісім контрольних операцій за періодичності моточисток 7300 годин ймовірність запобігання граничному стану може бути піднято до величини ($P_{pre} = 0.75$), але залишковий ресурс буде на дещо нижчому рівні ($R_{res} = 0.28$). Тривалість циклу експлуатації становитиме ($T_{cycle} = 0.783$).

Безрозмірна функція витрат (3):

$$w = 0.75 \cdot (1 - 1.2) + 1.2 = 1.05.$$

Витрати віднесені до тривалості циклу експлуатації (4):

$$Y_{reg} = 1.05/0.783 = 1.341.$$

Виражені в абсолютних одиницях витрати на виконання моточисток без урахування витрат на запасні частини становитимуть (5):

$$\frac{S_{reg}}{T_{cycle}} = \frac{1.341 \cdot 240 \cdot 10 \cdot 10^3}{7900} = 407.39 \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}.$$

Витрати на змінно-запасні частини віднесені до напрацювання визначаються за формулою (8):

$$\frac{S_{sp}}{t} = \frac{1 \cdot 10^3 \cdot (1 + 0.28) \cdot 500}{0.783 \cdot 7900} = 103.46 \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}.$$

Таким чином сумарні витрати на виконання технічного обслуговування становлять: $407.39 + 103.46 = 510.85$ дол. США/тис. год. Таким чином перехід на збільшену періодичність між регламентними технічними обслуговуваннями до 7300 годин забезпечить приблизно 15 % економії коштів на технічне обслуговування двигуна, однак при цьому необхідно збільшити витрати на контроль технічного стану. Якщо одна контрольна операція має трудомісткість 1 люд. год, то витрати на 7 контрольних операцій становитимуть:

$$\frac{S_c}{T_{cycle}} = \frac{Y_{reg} \cdot S_c}{T_m} = \frac{Y_{reg} \cdot H_{sch} \cdot q \cdot 10^3}{T_m}. \quad (9)$$

За формулою (9) визначимо:

$$\frac{S_c}{T_{cycle}} = \frac{1 \cdot 7 \cdot 10 \cdot 10^3}{7900} = 8.86 \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}.$$

Якщо на судні встановлено три таких двигуни як дизель-генератори, то сумарний ефект для судна становитиме:

$$\begin{aligned} E &= N \cdot (598.55 + 8.86 - 510.85) = \\ &= 3 \cdot 96.56 = 289.68 \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}. \end{aligned}$$

При напрацюванні кожного допоміжного двигуна на рік 4000 годин: $289.68 \cdot 4 = 1158.72$ дол. США/рік. Якщо засіб контролю (пневмоіндикатор) коштує 250 дол.США, то він окупиться приблизно за 78 діб.

У тому разі, якщо вартість засобу контролю істотно вища, завдання можна поставити в дещо іншому формулюванні: яку максимальну ціну засобу контролю за передбачуваного терміну окупності може заплатити судноплавна компанія, коли застосує його для відомої кількості контрольованих об'єктів.

Отримані результати процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами одного процесу зміни технічного стану використовуються у рамках цифрової стратегії адаптивного призначення попереджувальних профілактичних робіт [12].

Висновки

У даній статті розглянуто важливі аспекти адаптивізації системи технічного обслуговування суднових технічних засобів з урахуванням зміни їхнього технічного стану. Отримано наступні висновки:

1) технічне обслуговування судових систем є критичним аспектом для забезпечення безпеки та ефективності морського транспорту;

2) традиційні методи технічного обслуговування, що ґрунтуються на фіксованих інтервалах та

регламентованих підходах, можуть бути неефективними в умовах постійної зміни стану обладнання;

3) адаптивні стратегії технічного обслуговування, які базуються на аналізі змінного стану обладнання та прогнозуванні потреб у ремонті та заміні деталей, виявляються більш ефективними для забезпечення оптимальної експлуатації суден;

4) розробка адаптивних стратегій технічного обслуговування вимагає системного аналізу даних про стан обладнання, розробки алгоритмів адаптації та використання сучасних технологій та методів моделювання;

5) впровадження адаптивних підходів до технічного обслуговування може призвести до зменшення

експлуатаційних витрат та підвищення ефективності функціонування суднових систем.

6) зазначені у статті підходи до розробки адаптивних стратегій технічного обслуговування, що базуються на адаптації плану обслуговування до змінного стану суднових систем, виявляються перспективними.

Основним результатом проведених досліджень є визначення впливу зміни технічного стану на параметри технічного обслуговування суднових систем. Отримані висновки мають бути використані для підвищення ефективності функціонування суден та зменшення експлуатаційних витрат у морському транспорті.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Lazakis, I., Raptodimos, Y., & Varelas, T. J. (2018). Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks. *Ocean Engineering*, 152, 404–415. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.11.017>
- Karatuğ, Ç., Arslanoğlu, Y., & Soares, C. G. (2023). Review of maintenance strategies for ship machinery systems. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 22(5), 233–247. <https://doi.org/10.1080/20464177.2023.2180831>
- Jimenez, V. J., Bouhmala, N., & Gausdal, A. H. (2020). Developing a predictive maintenance model for vessel machinery. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5(4), 358–386. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2020.03.003>
- Karatuğ, A., & Arslanoğlu, Y. (2022). Development of condition-based maintenance strategy for fault diagnosis for ship engine systems. *Ocean Engineering*, 256, 111515. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111515>
- Animah, I., & Shafiee, M. (2019). Maintenance strategy selection for critical shipboard machinery systems using a hybrid AHP-PROMETHEE and cost benefit analysis: a case study. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 20(5), 312–323. <https://doi.org/10.1080/20464177.2019.1572705>
- Lazakis, I., Turan, O., Alkaner, S., & Ölçer, A. I. (2009). Effective ship maintenance strategy using a risk and criticality-based approach. *Proceedings of 13th Congress of Intl. Maritime Assoc. Of Mediterranean Sea*. https://pure.strath.ac.uk/portal/files/39330169/Lazakis_et_al_IMAM2009_ship_maintenance_strategy_using_a_risk_and_criticality.pdf
- Jiang, A., Dong, N., Tam, K. L., & Lyu, C. (2018). Development and Optimization of a Condition-Based Maintenance Policy with Sustainability Requirements for Production System. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1–19. <https://doi.org/10.1155/2018/4187575>
- Coraddu, A., Oneto, L., Ghio, A., Savio, S., Anguita, D., & Figari, M. (2014). Machine learning approaches for improving condition-based maintenance of naval propulsion plants. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 230(1), 136–153. <https://doi.org/10.1177/1475090214540874>
- Chen, Y., Gong, W., Xu, D., & Kang, R. (2018). Imperfect Maintenance Policy Considering Positive and Negative Effects for Deteriorating Systems With Variation of Operating Conditions. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 15, 872–878. <https://doi.org/10.1109/TASE.2017.2675405>
- Сучасні технології і методи моделювання інформаційних процесів в галузі водного транспорту з оглядом на морську безпеку : монографія / А.І. Головань, Є.В. Калініченко, І.П. Гончарук, та ін. – Одеса : НУ «ОМА», 2023. – 244 с. ISBN 978-617-7857-26-5
- Головань, А. (2023). Формування цифрових стратегій для вирішення задач підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, (46), 149–158. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288184>

Received (Надійшла) 12.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.04.2024

Study of the processes of adaptation of the maintenance system based on the results of changes in the condition of ship's machinery

A. Golovan

Abstract. The article deals with the important problem of optimizing the maintenance system of ship's machinery, considering their wear and tear, current and predicted condition. The analysis of recent research and publications in this area indicates the need to develop adaptive maintenance strategies aimed at efficient use of resources and increasing the reliability of ship systems. The purpose of the article is to study the processes of adaptation of the maintenance system based on the results of changes in the condition of ship's technical means and to develop practical recommendations for optimizing these processes. The results of the article include a study of the processes of adaptation of the parameters of the maintenance system as a result of one process of changing the technical condition. The author considers the methodology for determining the relative frequency of maintenance to determine the operating points of the system. In particular, the article discusses the impact of technical condition changes on costs and optimization of maintenance processes. The results of the study make it possible to determine the optimal maintenance strategies in terms of costs and time, considering the wear and tear and malfunctions of the ship's machinery. The conclusions emphasize the importance of developing adaptive approaches to the maintenance of ship systems, which will ensure their efficient operation and increase the overall productivity of maritime transport.

Keywords: adaptation, maintenance, cargo ships, change of technical condition, efficiency, maintenance costs, analysis.

В. П. Савчук, Д. О. Зінченко, А. К. Дзигар, А. І. Сатулов

Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МОДЕРНІЗОВАНИХ ПОРШНІВ МАЛООБЕРТОВИХ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ WARTSILA RT-FLEX96C ТА RTA96C

Анотація. Сучасні темпи розвитку суднового двигунобудування диктують необхідність створення універсальних методів дослідження теплового і напруженого стану основних деталей двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), які дозволяють скоротити час їх проектування і дефектації. Складність конструкції поршня помітно зростає з необхідністю збільшення потужності енергетичного обладнання. Проектування поршня в тривимірній задачі з повною оцінкою фактичної конфігурації напружено-деформованого стану (НДС) на даний час є складною проблемою. Великі можливості для таких розрахунків має метод скінченних елементів (МСЕ). Стаття присвячена аналізу напружено-деформованого стану поршня в його матеріалах під впливом експлуатаційних навантажень з використанням сучасних CAD/CAE комплексів. Встановлено, що максимальні сумарні напруження за критерієм фон Мізеса становлять 178,7 МПа для двигуна RT-flex і 198,6 МПа для двигуна RTA, які спостерігаються в зоні контакту опорної поверхні днища поршня зі спідницею. В цілому діаграма розподілу напружень на іншій частині поршня показує рівномірний розподіл напружень на днищі поршня (в середньому 90...120 МПа) і на його бічній поверхні (10...15 МПа). Максимальні значення зміщення становлять 0,55 мм для двигуна RT-flex та 0,357 мм для двигуна RTA. Результати аналізу ізоповрхонь діаграми переміщень вказують на локалізацію максимальних переміщень у центральній частині поршневої головки.

Ключові слова: modeling, piston, stress-strained state, load, piston crown, piston rings

Вступ

Постановка проблеми. Сучасні тенденції розвитку конструювання та технологій виробництва суднових двигунів внутрішнього згоряння направлено на підвищення економічних показників при заданому рівні надійності вузлів та механізмів. Поршні сприймають динамічні механічні та теплові навантаження. Днище поршня формує геометрію камери згоряння, яка впливає як на сумішоутворення в ній так і на температурний режим роботи головки поршня в цілому. Охолодження головок поршнів здійснюється шляхом подачі циркуляційного масла в утворену внутрішню порожнину, геометрія яких зазнає змін внаслідок проведених модернізацій. Також враховують особливості роботи пакету поршневих кілець та забезпечують їх температурний режим навантаження, зокрема шляхом розміщення канавок під поршневі кільця в максимально віддаленому від днища поршня положенні. Ще однією граничною умовою при конструюванні поршнів є їх маса, що впливає на сили інерції, що діють в деталях та підшипниках кривошипно-шатунного механізму, їх розміри та в підсумку енергоефективність. Інший напрямок модифікації конструкції поршнів пов'язано із поліпшенням трибологічних властивостей системи «циліндрова втулка – поршневе кільце – поршень».

Постійний пошук оптимальної геометричної форми поршня диктує необхідність використання комп'ютерних методів дослідження напружень різного походження основних деталей ДВЗ, що дозволяють скоротити терміни їх проектування [1, 2]. Складність конструкції поршня помітно зростає з необхідністю збільшення потужності енергоустаткування. Конструкція поршня в тривимірній задачі, з повною оцінкою фактичної конфігурації напружено-деформованого стану (НДС), в даний час є складною проблемою.

Для проведення таких розрахунків великі перспективи має метод скінченних елементів (МСЕ) [3-6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню та аналізу НДС елементів ДВЗ присвячено безліч публікацій, у яких в основному висвітлюють такі питання: аналіз напруженого стану випускних клапанів швидкохідного дизеля при прикладанні механічного навантаження [7]; оцінка напружено-деформованого стану головки циліндрів потужних дизельних двигунів із використанням мультифізичної технології ANSYS [8]; структурний і термічний аналіз лопаток газової турбіни з використанням МСЕ [9]; дослідження втрат на тертя в спідниці поршня і його динамічний аналіз на основі МСЕ [10-11]; моделювання динаміки поршневих кілець [12] і т.д.

Формулювання мети статті. Ціллю роботи є проведення аналізу напружено-деформованого стану поршня в його матеріалах під впливом експлуатаційних навантажень за допомогою сучасних CAD/CAE комплексів. Для досягнення поставленої цілі необхідно розв'язати наступні задачі: аналіз конструктивних особливостей та впливу умов експлуатації циліндро-поршневої групи малооберткових двигунів (МОД) на показники механічних напружень; розробка твердотільної моделі поршня МОД; моделювання складного напружено-деформованого стану поршня в режимі роботи дизеля з прогнозуванням теннапружено-деформованого стану поршня дизеля і його ресурсної міцності; визначення впливу модернізації конструктивних елементів циліндро-поршневої групи малооберткових двигунів виробництва Wartsila на характер розподілу механічних напружень в структурі матеріалу головки поршня.

Виклад основного матеріалу

Останні розробки в технології виробництва поршневих кілець виробниками МОД застосовано

також в двигунах серії RT-flex та RTA. Сьогодні в якості стандарту застосовується модернізований варіант конструкції поршня та поршневих кілець, що має назву TriboPack (рис. 1).

Особливістю нової конструкції поршневих кілець є те, що верхнє кільце має хромокерамічне покриття (CC), а нижні кільця всі мають покриття для припрацювання (RC).

Головною перевагою хромо-керамічних поршневих кілець CC є їх менша швидкість зносу та циліндрової втулки.

Поршневі кільця типу RC забезпечують безпечне та швидке припрацювання та протидіють утворенню задирів. Усі кільця мають прямий замок і попередньо спрофілювані. Попереднє профілювання забезпечує швидку герметизацію, безпечне припрацювання та стабільну гідродинамічну масляну плівку.

У базовому варіанті зазвичай використовуються головки поршнів, що призначено для установки пакету поршневих кілець із кількістю 5 шт.

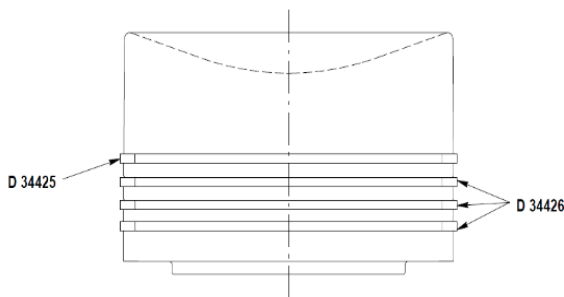


Рис. 1. Головка поршня для установки пакету поршневих кілець типу TriboPack: D34425 – верхнє хромо-керамічне поршневе кільце, D34426 – нижні поршневі кільця із покриттям для припрацювання (RC)

Для дослідження напружено-деформованого стану поршня двигунів RT-flex96C та RTA96C, з метою перевірки міцності модернізованої головки поршня, що необхідно внаслідок збільшення тиску на верхнє поршневе кільце пакету TriboPack, нами розроблено його спрощену твердотільну модель (рис. 2).



Рис. 2. Твердотільна модель головки поршня із пакетом поршневих кілець TriboPack

В якості матеріалу днища поршня використовується спеціальна термооброблена легована сталь із наступними фізико-механічними властивостями:

модуль пружності $E = 210$ ГПа; коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,28$; межа міцності на розрив $\sigma_B = 723,8$ МПа; межа текучості $\sigma_T = 620,4$ МПа.

Навантаження, що діють на головку поршня, вибираємо із діючого значення максимального тиску згоряння, що має значення для двигуна RTA $p_z = 16,8$ МПа, для двигуна RT-flex $p_z = 14,2$ МПа. Розподілення тиску за поршневими кільцями: $p_{1RTA} = 12,6$ МПа, $p_{2RTA} = 3,36$ МПа, $p_{3RTA} = 1,7$ МПа, $p_{4RTA} = 0,84$ МПа, $p_{1RT-flex} = 10,65$ МПа, $p_{2RT-flex} = 2,84$ МПа, $p_{3RT-flex} = 1,45$ МПа, $p_{4RT-flex} = 0,71$ МПа. Ці значення тисків діють на бічну поверхню поршня між поршневими кільцями та на самі поршневі кільця.

Результати дослідження приведено у вигляді епюра на рис. 3 – 6.

В результаті проведених досліджень було встановлено, що максимальні сумарні напруження за критерієм фон Мізеса становлять 178,7 МПа для двигуна RT-flex та 198,6 МПа для двигуна RTA, які спостерігаються в зоні контакту опорної поверхні днища поршня із юбкою (рис. 3). Загалом епюра розподілу напружень по іншій частині поршня демонструє рівномірне розподілення напружень по днищу поршня (в середньому 90...120 МПа) та по його бічній поверхні (10...15 МПа).

З метою детального визначення найбільш навантажених ділянок поршня було застосовано інструмент епюри «обмеження ISO». Це надає можливості виділити ділянки деталі в деяких межах напружень.

В даному випадку встановлено мінімальну межу напружень 40 МПа. Епюра із напруженнями, що перевищують вказане значення представлено на рис. 4.

Жорсткість головки можливо охарактеризувати за допомогою епюри переміщень, що представлено на рис. 5.

Встановлене в результаті розрахунків максимальне значення переміщень становить 0,55 мм для двигуна RT-flex та 0,357 мм для двигуна RTA. Результати аналізу ізоперехонь епюри переміщення вказує на локалізацію максимальних переміщень в центральній частині головки поршня. Інша частина головки поршня демонструє однорідність значень, які складають не більше, ніж 0,20 мм.

Розрахунок показників відносних деформацій матеріалів головки та спідниці поршня представлено також у вигляді епюри розподілу вказаного показника (рис. 6).

Картина розподілу відносних деформацій матеріалів добре узгоджується із епюрою розподілу сумарних напружень (рис. 4). Максимальне значення відносної деформації становить $77,67 \cdot 10^{-3}$, що також сконцентровано в місці контакту головки та штоку поршня. Даний ефект можливо описати як крайовий та той, що не впливає на міцність поршня в цілому.

Отримані результати параметрів напружено-деформованого стану вказують на високу механічну міцність прийнятих матеріалів поршня і поршневих кілець у запропонованому варіанті модернізації. Необхідно акцентувати увагу на той факт, що надана конструкція розвантажує ділянку канавок поршневих кілець головки поршня від напружень, що виникають внаслідок дії тиску газів.

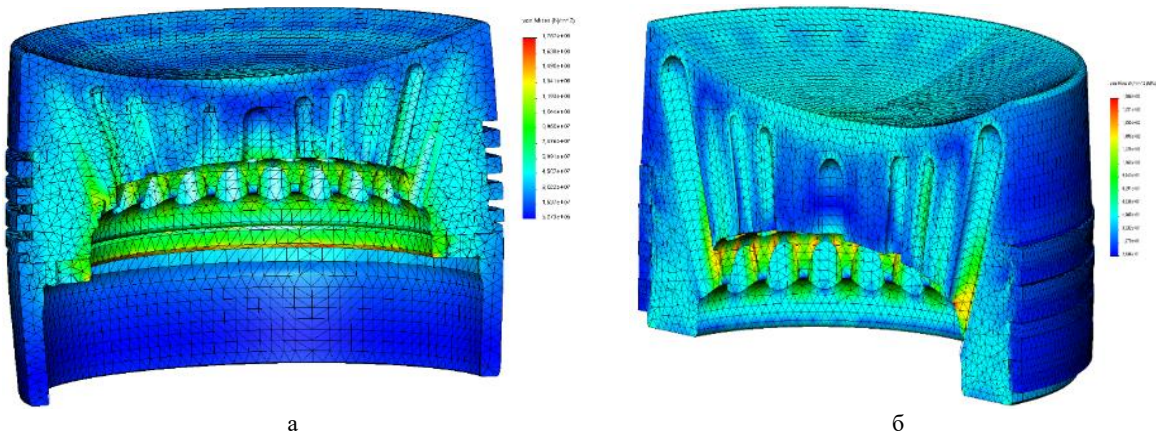


Рис. 3. Епюра розподілу напружень в головці поршня та поршневих кільцях двигуна RT-flex (а) та RTA (б)

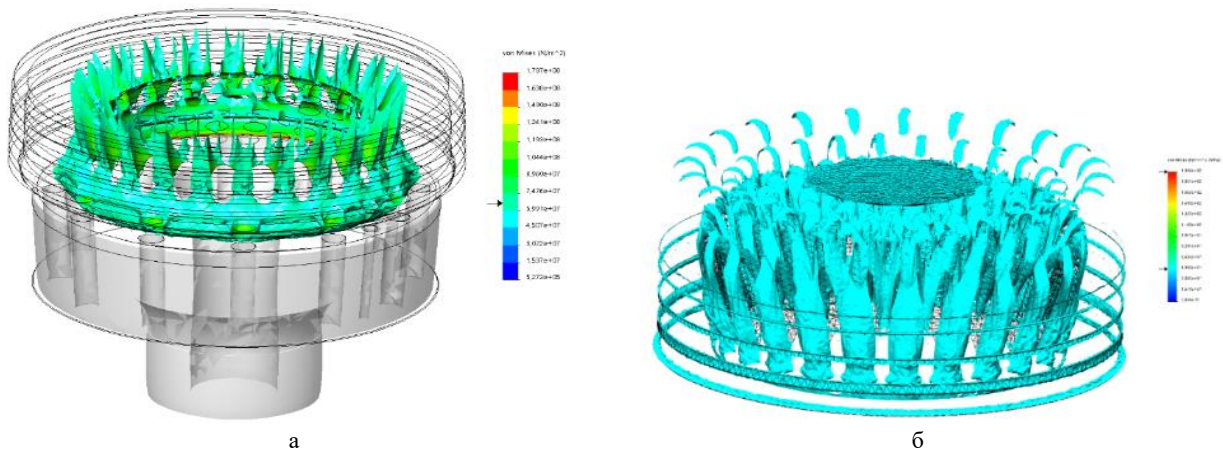


Рис. 4. Ізоповерхня епюри розподілу напружень в головці поршня та поршневих кільцях двигуна RT-flex (а) та RTA (б)

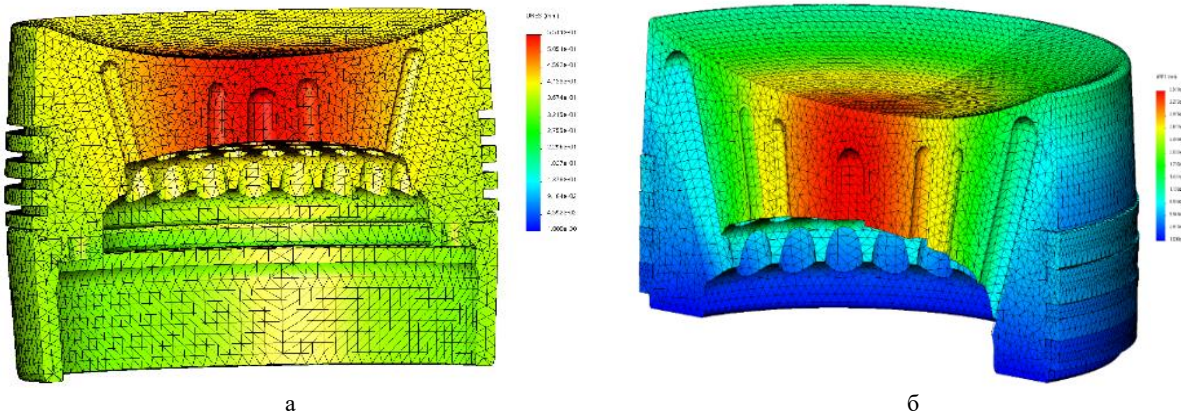


Рис. 5. Епюра розподілу переміщень в головці поршня та поршневих кільцях двигуна RT-flex (а) та RTA (б)

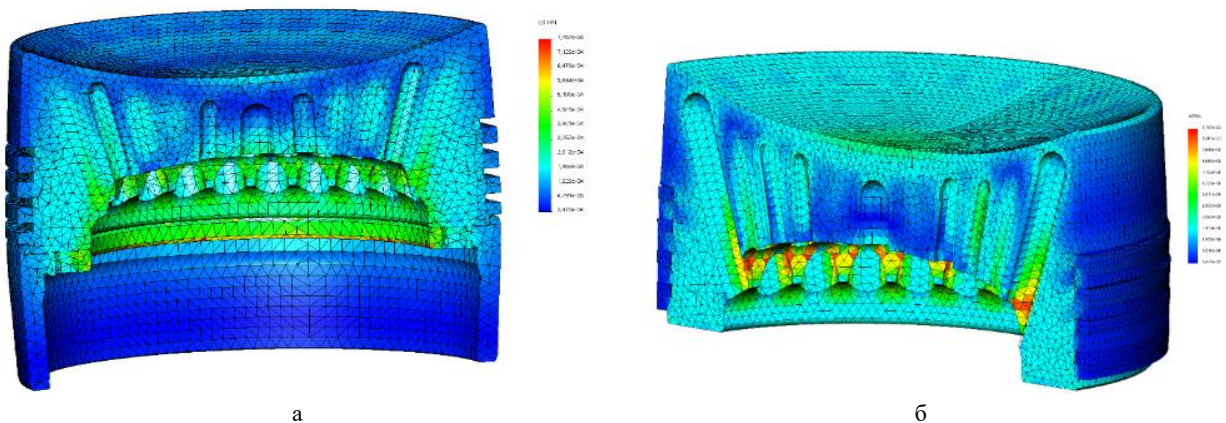


Рис. 6. Епюра розподілу відносної деформації в головці поршня та поршневих кільцях двигуна RT-flex (а) та RTA (б)

Висновки

Проведено аналізу напружено-деформованого стану поршня в його матеріалах під впливом експлуатаційних навантажень за допомогою сучасних CAD/CAE комплексів.

Проведене дослідження напружено-деформованого стану поршня дизельного двигуна Wartsila серії RT-flex96C та RTA96C при номінальному режимі навантаження вказує на наявність запасу міцності:

– максимальні сумарні напруження за критерієм фон Мізеса становлять 178,7 МПа для двигуна

RT-flex та 198,6 МПа для двигуна RTA, які спостерігаються в зоні контакту опорної поверхні днища поршня із юбкою;

– максимальні значення переміщень становить 0,55 мм для двигуна RT-flex та 0,357 мм для двигуна RTA.

Результати аналізу ізоповерхонь епюри переміщення вказує на локалізацію максимальних переміщень в центральній частині головки поршня.

Аналіз отриманих результатів вказує на достатню механічну міцність прийнятих матеріалів поршня і поршневих кілець.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Самарін, О.Є., Білоусов, Є.В., Савчук, В.П. (2018). Зменшення механічних втрат крейцкопфного двигуна. О.Є. Самарін, Є.В. Білоусов, В.П. Савчук (Ред.), *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування* (с. 306–308). Херсонська державна морська академія. https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2021/02/seutto_2018.pdf
2. Савчук, В. П., Білоусов, Є. В., Зінченко, Д. О., & Дзигар, А. К. (2019). Аналіз напружено-деформованого стану поршнів дизельних двигунів RT-FLEX 96C фірми Wartsila. У Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми» (с. 9–13). НУК імені адмірала Макарова. <http://rep.ksma.ks.ua/jspui/handle/123456789/2297>
3. Матвєєнко, В.В., Пилєв, В.А., Клименко, О.М., & Котуха, А.А. (2012). Оцінка ресурсної міцності поршня в САПР з урахуванням експлуатаційних режимів роботи двигуна. *Двигуни внутрішнього згорання*, 1, 120–123.
4. Ivashchenko, N. A., Nasyrov, R. A., & Timokhin, A. V. (1980). Evaluation of the thermal and stress-strain state of an internal combustion engine piston by the finite-element method. *Strength of Materials*, 12(2), 187–193. <https://doi.org/10.1007/BF00767712>
5. Савчук, В.П., Зінченко, Д.О., Самарін, О.Є., Дзигар, А.К., & Котов, А.І. (2021). Аналіз напружено-деформованого стану поршнів малообертового суднового двигуна WinGD RT-Flex50D. *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник*, 42, 50–58. <https://doi.org/10.31653/smf42.2021.50-58>
6. Триньов, О. В., Коваленко, В. Т., Тихоненко, А. Т., Клименко, О. М., & Куртов, Д. А. (2010). Аналіз напруженого стану випускних клапанів швидкохідного дизеля при прикладанні механічного навантаження. *Двигуни внутрішнього згорання*, (2), 65–69.
7. Krishnakanth, P. V., & Narasa Raju, G. (2013). Structural and Thermal Analysis of Gas Turbine Blade by using FEM. *International Journal of Scientific Research Engineering and Technology*, 2(2), 60–65. DOI:10.22161/ijaers/3.12.43
8. He, Zh. (2018). Piston skirt friction loss and dynamic analyses based on FEM method. *Industrial Lubrication and Tribology*, 70(4), 656–672. <https://doi.org/10.1108/ILT-12-2016-0320>
9. He, Z. P., Xie, W. S., Zhang, G. C., Hong, Z. Y., & Zhang, J. H. (2014). Piston dynamic characteristics analyses based on FEM method part I: effected by piston skirt parameters. *Advances in Engineering Software*, 75, 68–85. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.05.003>.
10. Wannatong, K., Chanchaona, S., & Sanitjai, S. (2008). Simulation algorithm for piston ring dynamics. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16(1), 127–146. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2007.11.004>.

Received (Надійшла) 16.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.04.2024

Comparative analysis of the stress-strain state of modernized pistons of low-speed marine engines Wartsila RT-flex96C and RTA96C

Volodymyr Savchuk, Dmytro Zinchenko, Anatoliy Dzygar, Anatoliy Satulov

Abstract. The current tempo of ship engine development dictates the need to create universal methods for studying the thermal and stress state of the main parts of internal combustion engines (ICE), which can reduce the time of their design and defect. The complexity of the piston design increases markedly with the need to increase the capacity of power equipment. The design of the piston in the three-dimensional problem, with a complete estimate of the actual configuration of the stress-strained state (SSS), is currently a complex problem. The finite element method (FEM) has great possibilities for such calculations. This article is devoted to the analysis of the stress-strained state of the piston in its materials under the influence of operating loads using modern CAD/CAE complexes. It is established that the maximum total stresses according to the von Mises criterion are 178.7 MPa for the RT-flex engine and 198.6 MPa for the RTA engine, which are observed in the contact area of the bearing surface of the piston bottom with the skirt. In general, the diagram of stress distribution on the other part of the piston shows a uniform distribution of stresses on the bottom of the piston (on average 90... 120 MPa) and on its side surface (10... 15 MPa). The maximum displacement values are 0.55 mm for the RT-flex engine and 0.357 mm for the RTA engine. The results of the analysis of the displacement diagram's isosurfaces indicate the localization of the maximum displacements in the central part of the piston crown.

Keywords: modeling, piston, stress-strained state, load, piston crown, piston rings.

Г. Д. Симбірський¹, Г. А. Плехова², М. В. Костікова², С. В. Очеретенко²

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

² Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ У ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБАХ

Анотація. Зазначена актуальність проведення різноманітних вимірювань на транспорті. Зокрема вимірювань високих температур газових потоків. Проведений аналіз стану цієї проблеми, що показав наявність деяких невирішених проблем на цьому напрямку. Для їх вирішення запропоновано використання інформаційних технологій на основі мікропроцесорної платформи Arduino. Докладно описані дослідження принципової можливості таких вимірювань. Запропонований, описаний та розроблений метод вимірювань високих температур газових потоків. Розроблено програму для обчислення температури газу вище 1000°C в реальному часі експерименту. Метод експериментально перевірений. Зроблений висновок про його перспективність та необхідність подальших досліджень для підвищення точності вимірювань за рахунок застосування сучасних методів, наприклад, фільтра Калмана.

Ключові слова: платформа Arduino, інформаційні технології, вимірювання високих температур газових потоків, мікропроцесорні системи, програмування мікропроцесорів.

Вступ

Важко переоцінити значення вимірювань різних фізичних величин при розробці, створенні та експлуатації транспортних засобів (ТЗ). «Економічна діяльність та громадяни в усьому світі залежать від доступу до безпечного та надійного транспорту. Це є одним із факторів, який найбільш важливий для успішного розвитку сучасного суспільства. Зі збільшенням потреби в доступному та ефективному транспорті зростає необхідність відповідних вимірювань та стандартів», – зазначив директор Міжнародного бюро мір та ваг Мартін Мілтон у своїй промові до Всесвітнього дня метрології.

У сучасному транспортному засобі десятки датчиків виробляють різноманітні вимірювання, результати яких використовуються різними системами керування ТЗ, у тому числі системою управління двигуном.

Але особливо різнобічні вимірювання актуальні при розробці двигунів та інших агрегатів і частин ТЗ, при їх випробуваннях та дослідженні супроводжуючих процесів. Наприклад, вимірювання температур продуктів згоряння різних видів палива у газотурбінних та інших двигунах транспортних засобів.

При цьому, як правило, проводять вимірювання для підтвердження результатів, отриманих за допомогою сучасних інформаційних технологій – комп'ютерного моделювання та ін. Незважаючи на розвиток цих розрахункових методів, без натурних експериментів з відповідними вимірюваннями конструктори і розробники обійтися не можуть. Найчастіше ці фахівці проводять вимірювання, самостійно, збираючи вимірювальні схеми, компонує різну вимірювальну апаратуру та розраховуючи похибки вимірювань.

Тому актуальним є завдання застосування сучасних інформаційних технологій на базі мікропроцесорної техніки для отримання, зберігання та обробки вимірювальної інформації. Використання таких технологій повинно, з одного боку, спростити процес вимірювань, а, з іншого, домогтися високої точності та швидкодії останніх. Крім цього, мікропроцесорна вимірювальна система повинна мати адекватну вартість, а працювати з нею могли б програмісти середнього рівня, якими є більшість вчених-експериментаторів.

Аналіз публікацій. В даний час існує багато варіантів побудови вимірювальних систем, що дозволяють здійснювати збір, зберігання, обробку та аналіз експериментальних даних. Серед таких систем платформи, що поєднують потужні апаратні модулі збору даних та управління з універсальними драйверами та прикладним програмним забезпеченням. Такі системи дозволяють ефективно вирішувати багато технічних і дослідницьких завдань, мінімізуючи витрати часу на розробку, так як пропонувані апаратні модулі досить універсальні, а системи графічного програмування вимагають мінімального часу освоєння. Розробнику не потрібно витрачати значні ресурси на вивчення мов програмування та вдосконалення своєї кваліфікації в розробці електронних систем з програмованими компонентами.

Найбільш відомим прикладом таких систем є продукція відомої фірми National Instruments [1], що об'єднує десятки різних моделей для збору даних, універсальні драйвера під всі поширені операційні системи і систему графічного програмування LabVIEW. Іншим прикладом таких платформ є професійна система ZETLAB [2], яка добре зарекомендувала себе, в тому числі, при вирішенні дослідницьких завдань.

Недоліком таких платформ є їх недостатня гнучкість – при вирішенні низки завдань не вистачає можливостей систем графічного програмування і доводиться програмувати апаратні модулі, використовуючи звичайні мови програмування. Це вимагає досить детального вивчення технічних особливостей використовуваних апаратних модулів збору даних та управління. Крім того, поширення таких платформ обмежує їх висока ціна.

На наш погляд, більш гнучкі можливості дає створення вимірювальних систем самостійно з використанням типових мікропроцесорних модулів. Наприклад, широкого поширення набули такі системи, як Parallax Basic Stamp [3], Raspberry PI [4] та ін.

У цьому випадку мається на увазі самостійна розробка програмного забезпечення керуючих мікропроцесорів на мовах програмування високого рівня та мові асемблера. Однак така гнучкість і нижчі витрати на матеріали досягаються значними витратами і

вимагають високої інженерної кваліфікації розробників: електронників і програмістів.

Між двома цими підходами існують компромісні рішення, що об'єднують невеликі недорогі апаратні моделі і програмне забезпечення у вигляді поширених мов програмування, що мають істотно більшу гнучкість в порівнянні з графічними мовами програмування, але не потребують детального вивчення особливостей архітектури конкретних мікропроцесорів.

Одним з найбільш вдалих представників такого класу апаратно-програмних платформ, на думку авторів дослідження, є в даний час платформа Arduino. Нас зацікавила можливість застосування цієї платформи для вимірювання високих (понад 1000°C) температур газових потоків термодатчиками з отриманням результатів у реальному часі експерименту. Наприклад, у двигунах транспортних засобів. Це досить складне завдання, що обумовлено нелінійністю характеристик відомих типів термодатчиків, значними важкоуловними похибками та іншими факторами.

Пошук інформації в Україні та в ближньому зарубіжжі показав, що саме таке завдання поки не вирішене дослідниками. Вимірювання температури газу (у тому числі повітря) за допомогою платформи Arduino не раз описані в літературі, проте в переважній більшості випадків вимірюється невисока (до 100°C) температура повітря. Це досить тривіальне завдання. Причому вимірювання виконуються не окремими термодатчиками, а спеціальними датчиками з платформи Arduino, призначені для температур до 100°C. Такі датчики складаються з термодатчика або термометра опорного мікропроцесора. Залежність величини термодатчика, що генерується термодатчиком, від температури її спаяна є лінійною. Тому і програма для роботи мікроконтролера вимірювальної системи, і сам вимірювальний процес досить прості.

При вимірюванні температур у заявленому діапазоні (вище 1000°C) дослідники стикаються з нелінійним характером залежності величини термодатчика від температури її спаяна $U = f(T_{\text{спая}})$. Аналіз показує, що автори не використовують можливості мікроконтролерів для роботи з нелінійною характеристикою $U = f(T_{\text{спая}})$. Деякі автори закладають у програму характеристику $U = f(T_{\text{спая}})$ у вигляді масиву з 1000 – 1500 значень (для діапазону від -60°C до -1200°C). На наш погляд, це не є раціональним.

Інших значних досліджень на заявлену тему в Україні і в ближньому зарубіжжі не було знайдено. Очевидно, що фахівці з термометрії зосереджені на великих підприємствах, де користуються вартісними вимірювальними системами або, навпаки, традиційними застарілими системами КСП-4.

Приблизно такий стан питання у країнах далекого зарубіжжя. Багато реалізацій проектів на базі Arduino з вимірювання температур хромель-копелевими термодатчиками до 400 – 600°C в побутових і промислових цілях: експлуатація опалювальних котлів та ін. Питаннями точності вимірювань та обліку похибок, що виникають при вимірюваннях термодатчиками конструктори не задаються, як не враховують і нелінійність характеристик термодатчиків, приклад розглянуто у роботах [5, 6].

Винятком є робота [7], авторами якої є бразильські дослідники з великого університету. У [7] досліджуються похибки вимірювання температури термодатчиками за допомогою системи Arduino, і аналізується точність цього процесу. Але, як було згадано вище, також для невисоких (до 125°C) температур і без урахування всіх складових теплообміну термодатчиків з навколишнім середовищем.

Таким чином, проведений аналіз показав, що завдання побудови вимірювальної системи на базі Arduino, що дозволяє автономно здійснювати збір, зберігання і обробку в реальному часі експерименту результатів вимірювання термодатчиками високих (понад 1000°C) температур газових середовищ, в тому числі повітря, в транспортній галузі на даний час не вирішена.

Мета та постановка задачі. Виходячи з проведеного аналізу, нами була сформульована мета дослідження, яка полягає у створенні вимірювальної системи для вимірювання високих (понад 1200°C) температур газових середовищ у транспортних засобах на базі мікропроцесорної платформи Arduino за допомогою термодатчиків.

Для того, щоб реалізувати запропоновану систему на базі сучасних інформаційних технологій, необхідно вирішити низку завдань:

- вирішити принципове питання щодо можливості вимірювання низьких значень напруги (одниці мілівольт) за допомогою мікропроцесорної платформи Arduino;
- розробити алгоритм програми для розрахунку температури спаяна термодатчиків за показаннями мілівольтметра;
- експериментально випробувати інтелектуальну вимірювальну високотемпературну систему на основі мікропроцесорної платформи Arduino, що автоматично в ході реального експерименту обчислює можливі похибки вимірювання.

Виклад основного матеріалу

На першому етапі потрібно виконати дослідження можливості вимірювання напруги за допомогою Arduino.

Ми пропонуємо розробити інтелектуальну вимірювальну високотемпературну систему на основі мікропроцесорної платформи Arduino.

У статті [8] докладно описані особливості та характеристики цієї мікропроцесорної платформи. Вибір цієї платформи обумовлений її широким розповсюдженням, наявністю у продажу величезної кількості датчиків, мікропроцесорів, різних супутніх радіоелектронних елементів, порівняно невисокою ціною, наявністю великої бібліотеки програм тощо. Використання мови програмування C++ дозволяє розробнику пристроїв і систем на платформі Arduino самому створювати програмне забезпечення для проектів. Мікропроцесори програмуються за допомогою спеціальної програми.

Arduino Uno має аналогові входи-виходи (піни) A0-A5. Скористаємося входом A0 і функцією `analogRead()`, щоб зчитувати дані про вимірювану напругу, прикладену між контактами A0 і GND (рис. 1) і виводити їх на екран. Значення напруги в числовому

вираженні від 0 до 1023, тому що Arduino Uno має 10-бітні аналогові або цифрові порти, а $2^{10} = 1024$ значень.

Мікропроцесорні системи Arduino програмується на мові C++. Для введення розробленої програми в пам'ять мікроконтролера використовують програмне середовище Arduino у версії 1.8.13, яке містить текстовий редактор, інтерфейс для зв'язку з мікроконтролером та налагоджувач програм для мови C++. Крім цього, на монітор біля додаткового вікна на екрані можна вивести значення необхідних змінних, тобто результати роботи програми.

Платформа Arduino дозволила значно спростити процес конструювання, створення, програмування та налагодження мікропроцесорних систем.

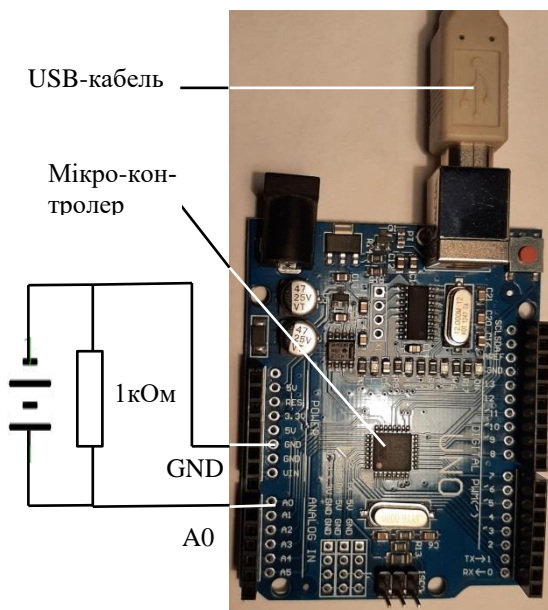


Рис. 1. Схема вимірювання напруги на основі плати Arduino Uno

Розроблені програми завантажуються в мікроконтролер, підключений до комп'ютера за допомогою звичайного USB кабелю.

Після виправлення помилок мікропроцесорна система готова до виконання завантаженої програми.

Програма, що керує вимірюванням напруги, розроблена нами на мові C++ та має такий вигляд:

```
1. void setup() {
2. Serial.begin(9600); }
3. void loop() {
4. int V1 = analogRead (A0);
5. double vol=V1*(5.0/1023.0);
6. Serial.print("V1=");
7. Serial.print(V1);
8. Serial.print("U=");
9. Serial.print(vol);
10. Serial.println("B");
11. delay (1000); }
```

У програмному коді в операторі 2 використовується функція Serial.begin (9600), що встановлює швидкість (частоту) обміну даними плати Arduino Uno з комп'ютером по USB-з'єднанню. У цьому варіанті це 9600 bps (bits per second, тобто бітів у секунду). Оператор 4 містить функцію analogRead, яка

зчитує рівень сигналу на аналоговому вході A0, з якого в операторі 5 обчислюється величина напруги на вході A0 щодо опорної напруги, що дорівнює 5 В.

У вікні Монітор порту середовища програмування (рис. 2) повинна бути виставлена така ж частота (праворуч внизу). Необхідно відкрити консоль командою Монітор порту з пункту меню Інструменти або поєднанням клавіш Ctrl+Shift+M, щоб бачити результати вимірювань. З рис. 3 видно, що напруга досліджуваного елемента живлення становить 0,93 В.

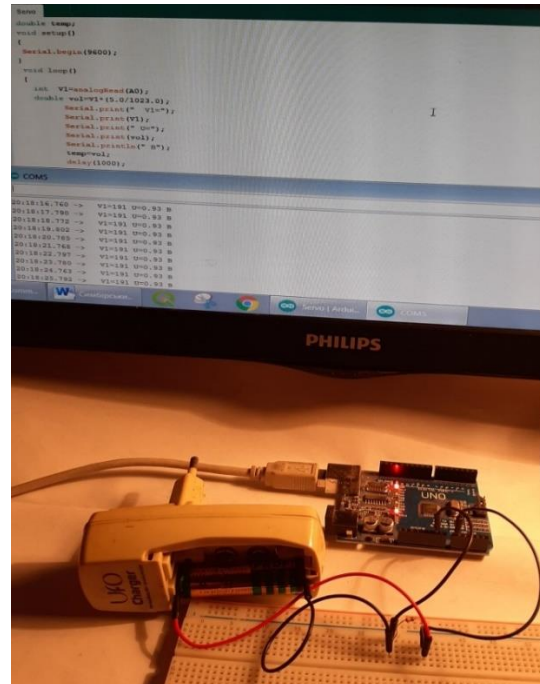


Рис. 2. Вимірювання напруги елемента живлення

Оператори 6–10 організують виведення результатів вимірювань у вікно Монітор порту (COM5 – назва порту, до якого під'єднана плата Arduino Uno через кабель USB). Функція delay в операторі 11 здійснює паузу під час виконання програми. При delay(1000) пауза становить близько 1 секунди, що також видно з результатів вимірів, наведених на рис. 3.

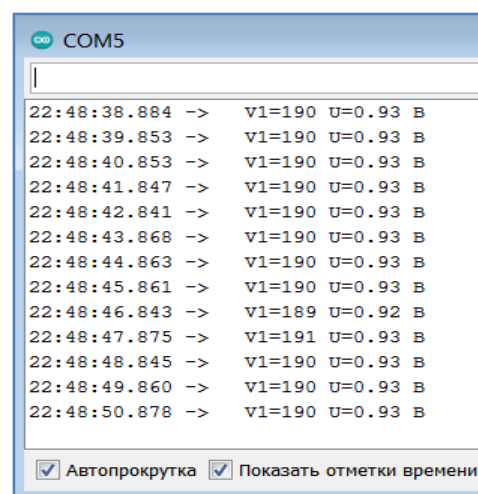


Рис. 3. Виведення на екран результатів вимірювань через Монітор порту

Таким чином, підтверджена можливість вимірювання напруги до 1 В за допомогою мікропроцесорної платформи Arduino. Поки не йдеться про точність таких вимірювань. Це питання буде досліджуватися далі.

На другому етапі дослідження треба виконати розробку мікропроцесорної системи для вимірювання високих температур. Температура газового середовища вимірюється за допомогою термопарі – з'єднаних зваркою або паянням двох дротяних провідників з певних матеріалів, що створюють при нагріванні місця з'єднання провідників різницю потенціалів, звану термоедс (рис. 4). Величина термоедс знаходиться в межах 0 – 50 мілівольт, що ослаблює процес вимірювань з точки зору їх точності.



Рис. 4. Вимірювання температури за допомогою термопарі

За величиною термоедс $U_{\text{спаю}}$, що виділяється хромелевим і алюмінієвим провідниками при нагріванні спаю і вимірюється мілі-вольтметром, що входить у склад мікроконтролера, можна визначити температуру спаю $T_{\text{спаю}}$ за табличними значеннями характеристики $T_{\text{спаю}} = f(U_{\text{спаю}})$. Номінальна статична характеристика (НСХ) термопарі задана у вигляді таблиці з двома стовпцями: температура робочого спаю та термоедс. Для вимірювання температури за допомогою термопарі необхідно виконати такі дії:

- виміряти термоедс термопарі ($E_{\text{заг}}$);
- виміряти температуру холодного спаю $T_{\text{хол. спаю}}$;

- за таблицею НСХ термопарі визначити термоедс холодного спаю $U_{\text{хол. спаю}}$, використовуючи температуру холодного спаю ($T_{\text{хол. спаю}}$);

- визначити термоедс робочого спаю, тобто додати едс холодного спаю до загальної термоедс ($U_{\text{роб. спаю}} = U_{\text{заг}} + U_{\text{хол. спаю}}$);

- по таблиці НСХ визначити температуру робочого спаю, використовуючи термоедс робочого спаю.

Ми спростили цю процедуру, тому що довжина хромелевого і алюмелевого провідників термопарі, на якій буде перевірятися методика, що розробляється, дозволяють під час експерименту приєднати контакти термопарі безпосередньо до плати Arduino. Це зробить непотрібним використання холодного спаю.

Деякі дослідники заводять табличні дані НСХ термопарі у вигляді масиву в пам'ять мікропроцесора, незважаючи на наявність в довідниках апроксимуючих поліномів для формульного розрахунку

температури спаю термопарі по її виміряній термоедс. Ми вважаємо ці обчислення занадто громіздкими і скористалися апроксимуючими поліномами власної розробки, визначеними в середовищі Mathcad для табличної НСХ хромель-алюмелевої термопарі.

Отримані формули наведемо нижче в програмі для управління вимірювальною системою, що розробляється. Результати роботи апроксимуючих поліномів авторської розробки наведено у таблиці 1.

У таблиці 1 перші два стовпці – це табличні значення температури спаю термопарі та її термоедс, а третій стовпець – це значення температури спаю термопарі, розраховані для табличних значень термоедс. Різниця між температурою з таблиці 1 НСХ і температурою, що розрахована з використанням розроблених поліномів, не більше 0,05%.

Зверніть увагу, що мова йде про температуру спаю термопарі. Справа в тому, що температура газу в точці вимірювання значно відрізняється від температури спаю. На це впливають похибки на випромінювання та на тепловідвід по проводам, а також інші фактори складного теплообміну спаю термопарі з оточуючим середовищем. Це не є предметом даного дослідження. Точність вимірювань по даному методу буде досліджуватись в наших подальших роботах.

Таблиця 1 – Обчислення температури спаю хромель-алюмелевої термопарі по апроксимуючим поліномам

| $T_{\text{спая}}, ^\circ\text{C}$ | $U_{\text{спая}}, \text{мВ}$ | $T_{\text{спая}} = f(U_{\text{спая}}), ^\circ\text{C}$ |
|-----------------------------------|------------------------------|--|
| 1100 | 45,119 | 1100,360 |
| 1110 | 45,497 | 1110,378 |
| 1120 | 45,873 | 1120,372 |
| 1130 | 46,249 | 1130,394 |
| 1140 | 46,623 | 1140,391 |
| 1150 | 46,995 | 1150,363 |
| 1160 | 47,367 | 1160,362 |
| 1170 | 47,737 | 1170,335 |
| 1180 | 48,105 | 1180,282 |
| 1190 | 48,473 | 1190,256 |
| 1200 | 48,838 | 1200,175 |

Використаємо отримані апроксимуючі формули для отримання значень температури газу при експериментальних вимірюваннях. Програма, що керує мікропроцесорною системою для вимірювання високої температури газу, розроблена мовою C++ і має такий вигляд:

```

1. void setup() {
2.   Serial.begin(9600); }
3. void loop() {
4.   int V1=analogRead(A0);
5.   double gradC, vol=V1*(5.0/1023.0);
6.   if (mV<8.137)
7.     gradC=(0.03935*mV+24.257952)*mV+(1-0.1*mV)*sin(0.785398*mV);
8.   else
9.     gradC=(((-24.231*mV+462.5)*0.01*mV-2304.2)*0.01*mV+2790.6)*0.01*mV-14.18;

```

```

10. Serial.print(" V1=");
11. Serial.print(V1);
12. Serial.print(" U=");
13. Serial.print(vo);
14. Serial.print(" B=");
15. Serial.print(" T=")
16. Serial.print(gradC)
17. Serial.println(" oC")
18. delay(1000); } }
    
```

У програмному кодї додалися в операторах 7 і 9 формули для обчислення температури спаю по апроксимуючим поліномам.

Звісно, для експериментальних випробувань було би добре скористатися стендом для запуску газотурбінних двигунів, але під час воєнного стану зробити це неможливо. Доведеться обмежитися іншим джерелом продуктів згоряння палива, наприклад, газовим пальником, що використовується при проведенні будівельних робіт. Нами використовувався газовий пальник EX-206 (рис. 5). Температура у його відкритому полум'ї може досягати 1300°C при використанні бутану у якості палива. При проведенні експерименту необхідно суворо дотримуватися правил пожежної безпеки.



Рис. 5. Газовий пальник EX-206

Для проведення експерименту нами була придбана термопара типу хромель-алюмель з модулем узгодження MAX6675 (рис. 6), що дозволяють вимірювати високі температури до 1200°C. Мікросхема MAX6675 поєднує операційний підсилювач, 12-бітний АЦП, схему компенсації температури холодного спаю і перетворювач в інтерфейс SPI. Є вбудований контроль обриву термопари.

На рис. 7 наведена схема зібраної експериментальної установки. Термопара хромель-алюмель та модуль узгодження під'єднані до плати Arduino Uno, яка з'єднана USB-кабелем з комп'ютером.

Програма була введена у мікроконтролер і налаштована за допомогою програмного середовища Arduino. Після запуску був запалений газовий

пальник та термопара була введена у високотемпературний газовий потік. На екрані комп'ютеру постійно відображалися поточні значення $U_{спая}$ та $T_{спая} = f(U_{спая})$.



Рис. 6. Термопара хромель-алюмель та модуль узгодження MAX6675

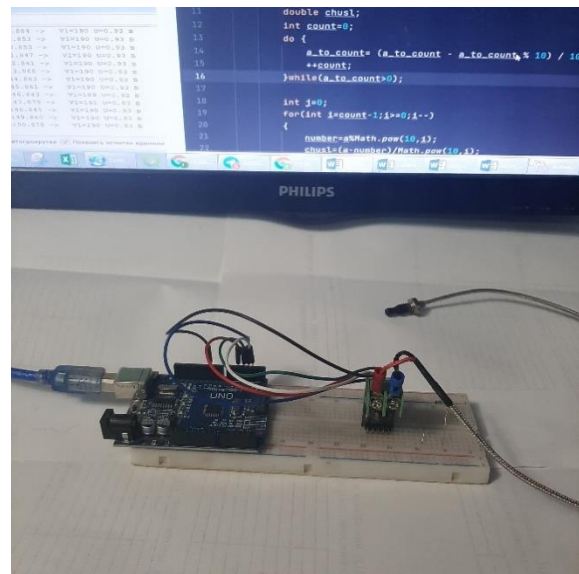


Рис. 7. Обладнання для вимірювання температури газу термопарою

У табл. 2 наведені декілька значень температури спаю термопари.

Таблиця 2 – Обчислення температури спаю хромель-алюмелевої термопари в експериментальних вимірюваннях

| $U_{спая}, мВ$ | $T_{спая} = f(U_{спая}), °C$ |
|----------------|------------------------------|
| 46,995 | 1150,363 |
| 46,249 | 1130,394 |
| 46,623 | 1140,391 |
| 45,497 | 1110,378 |

Точки вимірювання визначалися довільним чином. Точність вимірювань не дуже нас цікавила, так як завданням експерименту було впевнитись у прин-

циповій можливості реалізації запропонованого методу, Обсяг даного дослідження не дозволяє вирішувати більш широке коло питань.

Таким чином, експериментальна перевірка запропонованого методу вимірювання високої температури газу (до 1800°C термопарою із платинородію та до 1200°C термопарою з хромель-алюмеля) показала можливість застосування такого методу.

Висновки

Метою даного дослідження є створення системи для вимірювання високих (понад 1000°C) температур газових середовищ на основі мікропроцесорної платформи Arduino за допомогою хромель-алюмелевих термопар на основі сучасних інформаційних технологій.

Автори показали принципову можливість вимірювання низьких значень напруги (одиниць мілівольт) за допомогою мікропроцесорної платформи Arduino.

Розроблено алгоритм розрахунку температури спаю термопар за показаннями мілівольметра.

Експериментально перевірений запропонований метод вимірювань високих температур газових

потоків на основі мікропроцесорної платформи Arduino, що автоматично в ході реального експерименту підраховує можливі помилки вимірювання.

Використання Arduino дозволяє розробнику скомпонувати пристрій для реалізації описаного у цій роботі методу з потрібними властивостями та самостійно запрограмувати мікропроцесор до виконання потрібних дій у заданій послідовності.

Таким чином був сконструйований, зібраний, запрограмований спеціально розробленою програмою та експериментально перевіреним методом вимірювань високих температур газових потоків на основі мікропроцесорної платформи Arduino. Експериментальна перевірка в умовах, що максимально наближені до реальних, показала, що розроблений метод та реалізуюча його електронна схема працездатні та можуть використовуватися для проведення таких вимірювань.

Продовженням цього дослідження повинні стати дослідження, що присвячені точності вимірювань, врахуванню чи усуненню похибок вимірювань, зокрема розрахунку помилки вимірювання на променистий теплообмін термопар з зовнішнім середовищем.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Your Go-To Source for Innovative Solutions: <https://www.ni.com/en/solutions.html>.
2. Intelligent Sensors and Controllers. <https://zetlab.com/en/support/digital-sensors-zetsensor-series>.
3. Python, BASIC, C and Blockly Robotic Kits and Curriculum. <https://www.parallax.com/propeller-multicore-concept>.
4. Raspberry pi for industry. <http://www.raspberrypi/for-industry>.
5. Industrial Thermometer with MAX6675 Thermocouple & Arduino. <https://how2electronics.com/industrial-thermometer-max6675-thermocouple-arduino>.
6. How to Arduino Thermocouple Interface. <https://bestengineeringprojects.com/how-to-arduino-thermocouple-interface>.
7. L. R. R. da Silva, J. R. Ferreira-Oliveira. Uncertainty quantification using thermocouple and Arduino compatible hardware. *Engenharia Térmica (Thermal Engineering)*, Vol. 20, No. 2, June 2021. P. 47-54.
8. Симбірський Г. Д., Кушнір Д. Є. Застосування інформаційних технологій та мікропроцесорної техніки для зниження кількості ДТП. Автомобіль та електроніка. Сучасні технології: електронне наукове спеціалізоване видання. Харків, 2020. Вип. 18. С. 65-70.

Received (Надійшла) 28.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.04.2024

Application of information technologies and microprocessor techniques for carrying out measurements in vehicles

G. Simbirsky, G. Pliekhova, M. Kostikova, S. Ocheretenko

Abstract. Problem. The subject of research is the fundamental possibility of using modern information technologies based on microprocessor technology for obtaining, storing and processing measurement information. In particular, the use of the Arduino microprocessor platform for measuring high (up to 1200°C) temperatures of gas flows. **Goal.** The purpose of the research is to create a measuring system for measuring high (over 1000°C) temperatures of gaseous media in vehicles based on the Arduino microprocessor platform using thermocouples. **Research objectives.** In order to implement the proposed system based on modern information technologies, it is necessary to solve a number of tasks: 1. To solve the fundamental question regarding the possibility of measuring low voltage values (units of millivolts) using the Arduino microprocessor platform; 2. Develop a program algorithm for calculating the thermocouple junction temperature based on millivoltmeter readings; 3. Experimentally test an intelligent high-temperature measuring system based on the Arduino microprocessor platform, which automatically calculates possible measurement errors during a real experiment. **Methodology.** For conducting the experiment, a chromel-alumel type thermocouple with a matching module MAX6675 was used, which combines an operational amplifier and a converter into an SPI interface. The diagram of the assembled experimental setup is given. The thermocouple and matching module are connected to the Arduino Uno board, which is connected by a USB cable to the computer. **The following results are received.** The possibility of measuring voltage up to 1 V using the Arduino microprocessor platform has been confirmed. The gas flow temperature was measured at several points in the range of 1100-1150°C with sufficient accuracy. The experiment showed a fundamental possibility of implementing the proposed method. **Conclusions.** Designed, assembled, programmed with a specially developed program and experimentally verified method of measuring high temperatures of gas flows based on the Arduino microprocessor platform. Experimental testing in conditions as close as possible to real ones showed that the developed method and the electronic circuit implementing it are operational and can be used for such measurements.

Keywords: Arduino platform, information technologies, measurement of high temperatures of gas flows, microprocessor systems, microprocessor programming.

М. О. Вжесневський, О. О. Чала

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВНУТРІШНЬО-СКЛАДСЬКИХ ВИРОБНИЧИХ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ INDUSTRY 4.0: ЕНЕРГООЩАДЛИВІСТЬ, ПРОДУКТИВНІСТЬ, МОБІЛЬНІСТЬ, МОДУЛЬНІСТЬ, АВТОНОМНІСТЬ

Анотація. У статті розглянуто основні тенденції та завдання, що ставлять перед собою топові фірми основним профілем роботи яких є розробка, впровадження та підтримка систем внутрішньоскладської логістики. Основними критеріями на які в найближчому майбутньому будуть направлені розробки в сфері автоматизації виробничої внутрішньої логістики є енергоощадливість, продуктивність, мобільність та автономність. Доведено, що одним із основних шляхів удосконалення виробничих внутрішньоскладських логістичних процесів є шатлові системи, що можуть бути модернізовані, шляхом використання концепції кіберфізичних підходів. Це є один з найкоротших шляхів підвищення параметрів зменшення часу транспортування, сортування, зберігання та підвищення продуктивності, енергоефективності та гнучкості процесів виробничої внутрішньоскладської логістики.

Ключові слова: автоматизація, виробництво, внутрішньоскладська логістика, INDUSTRY 4.0, автономність, енергоощадність, модульність.

Вступ

Останні роки видався непростим сфери логістики України, на ринку все ще залишаються топові гравці, які, не дивлячись на всі негаразди, обслуговують клієнтів та допомагають їм підтримувати бізнес та успішно розвиватися [1]. Якість обслуговування визначається багатьма факторами, першочергові з яких – вчасне отримання та відповідність замовленню. Впоратися з цими завданнями та забезпечити безперебійну роботу складу 24/7 навіть в екстремальних умовах може автоматизація складу та сучасні технології відбору товару в середині самих зон складу [2]. Цілями автоматизації в сучасних реаліях є збільшення продуктивності, оптимізація витрат, зменшення навантаження на складських працівників, ощадливе використання електроенергії. При цьому, важливим критерієм є швидкість реалізації проекту на основі модульності обладнання.

Однією з основних умов, що забезпечує високі темпи зростання продуктивності праці в промисловості, є постійне вдосконалення парку технологічного обладнання. Це досягається насамперед заміною застарілого обладнання новим, сучасним [3].

Провівши аналіз ринку України та Європи було виділено ряд повідних компаній, що займаються складською логістикою та автоматизацією складських ресурсів, було виділено ряд лідерів, які застосовують новітні перспективні підходи/ Актуальністю поведених досліджень визначається необхідністю забезпечення підвищення ефективності чинного парку обладнання, з невеликими витратами і швидкою окупністю для вирішенні ряду питань виробничої внутрішньоскладської логістики.

Метою статті є обґрунтування вибору оптимальних критеріїв модернізації та підвищення якості виробничої внутрішньоскладської логістики, за ра-

хунок використання автоматизованих модулів для підвищення продуктивності та мобільності та модульності, зниження енерговитрат в системах автоматизації виробничої складської логістики. **Об'єктом дослідження** є процеси модернізації в виробничих внутрішньоскладських автоматизованих системах на основі концепції кіберфізичних підходів INDUSTRY 4.0, а предметом – шляхи підвищення їх продуктивності за критеріями енергоощадливості та мобільності, автономності та модульності.

Основна частина

Якщо говорити про позитивні зрушення в українській логістиці, можна відмітити такі тенденції:

1) складська інфраструктура поступово розгалужується, відновлюється, будуються нові склади, що є полем для нових інноваційних рішень;

2) спостерігається попит на складські приміщення невеликого розміру, це логістичні хаби, що використовуються для накопичення продукції;

3) логістичні провайдери впроваджують нові послуги та рішення для своїх клієнтів, з використанням нового комп'ютерно-інтегрованого підходу та автоматизації процесів усіх рівнів;

4) також, відома як сталий розвиток логістики, зелена логістика охоплює комплекс політик і заходів, спрямованих на зменшення впливу бізнес-діяльності на навколишнє середовище. Свідомість про екологічні питання набуває все більшого значення, оскільки компанії прагнуть зменшити відбиток вуглецю, забруднення та відходи на всіх етапах ланцюга поставок [4].

Використання електромобілів, підтримка пунктів забору та використання біорозкладних матеріалів – це лише деякі з заходів, які компанії впроваджують для обмеження відходів та зменшення споживання енергії під час своїх бізнес-процесів.

Звичайно, на українську логістичну галузь впливають і виклики – переформатування транспортної та складської інфраструктури, покращення мобільності та відновлення бізнес-процесів [5]. Для аналізу було використано використали «Портал відкритих даних від Міністерства цифрової трансформації України» [6]. З поведеного аналізу видно, що логістичні компанії підвищують свій капітал, розвиваються. Провівши аналіз було виділено ряд компаній, які займаються автоматизацією логістики прослідковано тенденції розвитку. Основними завданнями, що перед собою ставить група компаній KAPELOU, виробник роботизованого обладнання та постачальник комплексних рішень для складу є [7]:

- оптимізація витрати, шляхом збільшення корисної площі на складі;
- зменшення навантаження на персонал;
- скорочення тривалості обробки товарів, застосовуючи ефективні технології відбору;
- спрощення контролю зібраних ящиків після відбору замовлень;
- забезпечення швидкості реалізації проєктів за допомогою модульності обладнання;
- зниження споживання електроенергії;
- встановлення обладнання, яке в разі потреби можна швидко релокувати та використовувати на іншому складі.

Необхідно також виділити компанію «SBRobotics» [8]. Це передова в Україні організація, яка спеціалізується на розробці та впровадженні передових робототехнічних рішень. Основними завданнями, що ставить перед собою компанія, є трансформувати виробничі логістичні процеси та покращити ефективність компаній за допомогою автоматизації та інтелектуалізації. В першу чергу «SBRobotics» прагне надати клієнтам передові та інноваційні рішення, які дозволяють їм мати конкурентну перевагу на ринку. «SBRobotics» має широкий спектр робототехнічних рішень, включаючи автоматизацію процесів, роботи зі штучним інтелектом, розробку роботів для конкретних завдань та багато. Основні напрямки роботи:

- інтеграція та сумісність: розробка робототехнічних рішень з урахуванням сумісності та інтеграції з наявною інфраструктурою та системами клієнтів;
- навчання та підтримка: надається широкий спектр навчальних програм та підтримки для клієнтів, щоб їхній персонал отримав необхідні навички та знання для ефективної роботи з нашими робототехнічними рішеннями;
- безпека та регуляторні питання: питання безпеки та відповідності регуляторним вимогам, дотримання стандартів безпеки та рішень, які відповідають найвищим нормам і вимогам.

Компанія вбачає перспективу у використанні передових технологій на основі нововведень належ в роботизації, за рахунок використання ролаштабелер - підйомно-транспортних пристроїв, створений для переміщення вантажів у приміщенні складу; універсальних платформа, що використовуються для обробки різних вантажів; сортувальників, які є ключовим елементом автоматизованої

системи, метою якого є точний розподіл вантажів за відповідними місцями.

Аналізуючи ринок виробників обладнання для автоматизації логістики, необхідно виділити також «Sklad Service» [9] – це компанія, що реалізує обладнання для автоматизації складу – це набір технологій, методів і систем, які дозволяють управляти і покращувати роботу складу за допомогою різних автоматизованих систем, таких як стелажні системи, конвеєри, вантажну техніку, автоматизовані системи зберігання, підйомні столи, пластиковий тару, сміттєві контейнери. Компанія вирішує комплекс завдань: впроваджувати функціональні ідеї, ефективно використовуючи площу замовника. Пропонує варіанти і комбінації, щоб в результаті вийшов максимально опрацьований проєкт по заданих параметрах і бюджету.

Аналізуючи різноманіття ринку, на якому представлено достатня кількість компаній, що займається автоматизацією логістики, можна зробити висновки, що ця сфера є затребуваною, перспективною та має «запас» для розвитку. Підсумовуючи, можна зробити висновок, що автоматизація складів у сучасних умовах ставить перед собою питання для вирішення, що базуються на енергоощадливості, продуктивності, мобільності та модульності.

Для реалізації цих поставлених завдань, необхідно вирішити завдання, що лежать в концепціях автоматизації логістики, з використанням кіберфізичних підходів Industry 4.0, і є важливим інструментом для підвищення продуктивності роботи логістичних операторів на основі використання технологій комп'ютерного програмного забезпечення, робототехніки чи робомашин [10]. Існує багато різних технологій, пов'язаних з автоматизацією в логістиці. Постійно розробляється нове обладнання та програмне забезпечення. Досліджено основні тренди такі як автоматизація та діджиталізація логістичних процесів, зокрема, автоматизації складських комплексів чи їх складових частин з використанням кібефізичних підходів Industry 4.0. Таким чином, основним об'єктом логістики є матеріальні потоки та способи реалізації їх переміщення [11].

Використання багаторівневих шатлових систем частково вирішує проблему транспортування та зберігання великих об'ємів продукції на складах [12]. Але значним недоліком відзначити високу вартість шатлових конструкцій та їх монтажу, обслуговування та невисоку енергоефективність [10].

Концепція Industry 4.0 включає використання автоматичних мобільних робототехнічних платформ (Shuttle), або автоматизованих навантажувачів, що переміщуються вздовж або всередині стелажної системи, здійснюють пошук, переміщення та видачу виробів залежно від заявок, що надійшли. Їх застосування дозволяє знизити операційні витрати та оптимізувати управління ланцюжками постачання й доступ до ресурсів, за рахунок більш ефективного управління запасами [13].

Одним із важливих компонентів, на яких базуються сучасні Warehouse Management Systems (WMS), в рамках Industry 4.0, є впровадження таких технологій:

– Mobile Autonomous Rack System – системи стелажів, що встановлюються в систему рейкових напрямних, так що полиці можуть переміщатися вперед і назад вздовж рейок [14];

– Autonomous Vehicle Storage and Retrieval System (AS/RS) – використання автоматизованих керованих підіймно-транспортних пристроїв, які доставляють вироби на склад і витягують їх звідти у разі потреби;

– Compact Storage and Retrieval System – автоматизовані системи, які ефективно та безпечно зберігають вироби компактних розмірів;

– Collaborative Robot System – система автоматичного групового управління мобільними роботизованими платформами, яка взаємодіє з оператором, з метою спільного використання робочого простору для вирішення завдань зберігання, навантаження, відвантаження виробів.

На даний момент часу існують стратегії зберігання виробів у системах WMS. Варто зауважити, що кожна з проаналізованих стратегій, має певну мету для досягнення економічного ефекту у вигляді досягнення певних вимог. Всі вони переслідують мету оптимізації визначених параметрів складування, при цьому є можливість знехтувати іншими. Це, відповідно, не дозволяє виділити якусь універсальну стратегію зберігання виробів. Сучасні системи WMS базуються на впровадженні автоматизованих робототехнічних складів із хаотичним зберіганням високої щільності.

Сучасним трендом в автоматизації складських приміщень є використання шатлових систем для обслуговування виробничих складів та підготовчої зони складу. Традиційно шатли, як правило, реалізуються з волоочильними кабелями. З погляду гнучкості й можливості пересування на складі й виробництві це викликає певні проблеми, що можуть бути вирішені за рахунок використання автономних шатлів. До сімейства шатлів належать каналні транспортні засоби й автоматичні розподільні транспортні засоби. Один із можливих прикладів конструктивного оформлення автономного шатла для забезпечення внутрішньоскладського транспортування вантажів проміж рядами стелажів показаний на рис. 1. В цьому прикладі бачимо автономний транспортувальний шатл у вигляді електромеханічної чотириколісної платформи (рис. 1) із розташуванням пари рушійних коліс з одного краю, а пари підтримуючих коліс – відповідно на протилежному краю, та з центральним розташуванням майданчику для транспортованого вантажу проміж осями коліс. В таких автономних транспортувальних шатлах для забезпечення рушійних зусиль найбільш доцільним є використання електроприводів, оскільки вони можуть мати досить невеликі габарити та при цьому не утворюють викидів до навколишнього середовища, як, наприклад, приводи із двигунами внутрішнього згоряння, що насправді є принципово важливим для закритих складських приміщень.

Компоновка автономного транспортувального шатлу із центральним розташуванням вантажу дозволяє оформити автоматизовані електроприводи рушійних коліс у вигляді досить компактного вуз-

лів, що розташовані по краям човника. При цьому, за рахунок спеціальної висувної системи (рис. 2.) можна забезпечувати розвантаження транспортваного вантажу у двох напрямках, що дозволить обслуговувати два ряди стелажів одним таким шатлом.



Рис. 1. Загальний вигляд автономного човника (шатла) для внутрішньоскладського транспортування проміж рядами стелажів, запропонованого фірмою Kapelou

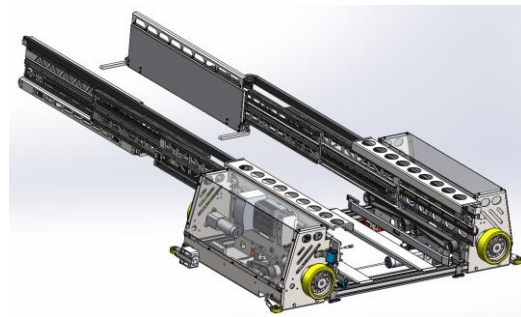


Рисунок 2 – Внутрішня будова автономного човника (шатла) для внутрішньоскладського транспортування проміж рядами стелажів, запропонованого фірмою Kapelou

Передбачається, що запропонований транспортувальний шатл буде рухатись по спеціальному металевим напрямним, які заздалегідь встановлені проміж двома рядами стелажів на відповідному рівні.

Забезпечення повної автономності таких транспортувальних шатлів є принциповою на відміну від іншого складського устаткування, оскільки, окрім різних переваг, забезпечує також менші габарити за рахунок відсутності робочого місця для людини-оператора, а це дозволить зменшувати простір проміж рядами стелажів та внаслідок цього дозволить також зменшити довжину транспортувальних шляхів, що, зрозуміло, буде надавати переваг системі внутрішньоскладського транспортування в цілому. Досить важливим питанням є вибір типу електричних двигунів для мотор-коліс автономного транспортувального шатлу, який є досить складним об'єктом автоматизації, оскільки для нього слід забезпечувати автоматизацію як усталених та й перехідних режимів при наявності окремих спеціальних вимог щодо точності позиціонування та, можливо, плавності рухів при бажаній мінімізації енергоспоживання.

Розв'язування кожної із означених та інших спеціальних задач автоматизації транспортувального човника потребує належного врахування притаманних шатлу властивостей, що можна забезпечити за рахунок використання відповідних математичних моделей процесів, що відбуваються у човнику на різних режи-

мах експлуатації. В якості окремих досліджуваних питань щодо транспортувального шатлу розглядати- мемо далі низку питань, які пов'язані із забезпеченням горизонтального переміщення вантажу.

Відповідно прийнятій схематизації (рис. 3, а) прямолінійний рух шатлу уздовж напрямних між радами стелажів забезпечується при обертанні коліс, на які він спирається. Отже, завдяки такому припущенню маємо, що прямолінійна координата транспортувального шатлу та кут повороту його коліс зв'язані співвідношенням такого вигляду:

$$\dot{s} = r_w \cdot \dot{\varphi}, \quad (1)$$

де r_w – радіус коліс човника, φ – кут повороту коліс транспортувального човника.

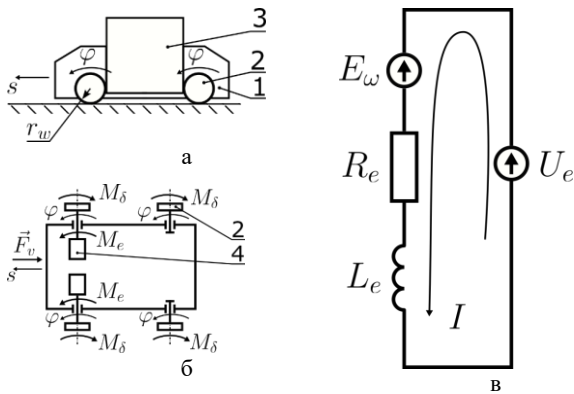


Рис. 3. Загальна (а), кінематична (б) та еквівалентна електрична схеми електродвигунів (в) шатлу: 1 – човник; 2 – колесо; 3 – вантаж; 4 – електричний двигун

В прийнятій кінематичній схемі (рис. 3б) враховано наявність двох опорних коліс, а також й двох рушійних коліс, що виконані у вигляді мотор-колів із індивідуальними електричними двигунами.

Для належного відтворення властивостей транспортувального атоматизованого шатлу слід врахувати тертя кочення коліс (рис. 3, б) човника:

$$|M_\delta| \leq M_\delta^{\max}; \quad M_\delta^{\max} \approx mg\delta/4, \quad (2)$$

де M_δ та M_δ^{\max} – момент тертя кочення колеса та його граничне значення, відповідне зрушенню колеса; m – повна маса човнику та δ – коефіцієнт тертя кочення коліс.

Врахування моменту тертя кочення коліс (2) є важливим для належної оцінки руху шатла на різних режимах, але його врахування призводить до суттєвої

нелінійності. Прийнята схематизація (рис. 3) транспортувального шатлу та сформульовані тут припущення щодо факторів, які дозволяють виконати дослідження процесів, що відбуваються при прямолінійному русі автономного атоматизованого шатлу, яким забезпечується функція горизонтального переміщення вантажів. Шатли з електричним приводом зазвичай з'єднані з носієм за допомогою волоочильного кабелю. Тільки в новітніх розробках проектується автономні шатли. Можливим її рішенням є модернізація обладнання за допомогою синтезу технологій ПоТ і сучасних сенсорів з використанням кіберфізичних підходів INDUSTRY 4.0. Логістичні шатли застосовують на складах із високим ступенем автоматизації. За рахунок використання сучасного програмного забезпечення стає можливою повністю автономна робота шатлів, які без участі оператора переміщують вантаж в потрібні комірки.

Завдяки автономному режиму шатлів забезпечується максимальна ефективність роботи складу. Зокрема, використання шатлових систем дозволяє знизити навантаження на наявний персонал – для обслуговування одного стелажного масиву вистачає одного оператора. При цьому швидкість обробки надходжень на склад і набору замовлень не знижується. Автономне керування атоматизованим шатлом має забезпечувати стабільність заданих умов, а також плавний перехід від одного стану до іншого усталеного стану. Основною перешкодою стабільності станів є різноманітні неконтрольовані випадкові збурення різного походження, що впливають на транспортувальний шатл.

Забезпеченню саме заданих станів істотно перешкоджають також невизначені заздалегідь умови експлуатації, у першу чергу змінна маса транспортованого вантажу, яка може бути будь-якою в межах максимально допустимого значення. Розроблені математичні моделі дозволяють досліджувати процеси в атоматизованому автономному транспортувальному шатлі як в електромеханічній системі, але для розв'язування інженерних задач щодо атоматизації ці моделі мають бути відповідним чином тотожно перетворені. Саме на це будуть направлені наступні дослідження та експерименти. На даному етапі було проведено модернізацію з врахуванням одержаних математичних моделей та рішень та проведено випробування в виробничих умовах.

У табл. 1 наведено результати виробничих експериментів і середньостатистичні параметри стелажно-шатлових систем до модернізації та після .

Таблиця 1 – Технічні характеристики шатлових систем

| Характеристика | Значення параметру до модернізації | Значення параметру після модернізації |
|--|------------------------------------|---------------------------------------|
| Висота стелажу, мм | 12000 | 14 000 |
| Вантажопідйомність кран-штабелера, кг | 6500 | 8500 |
| Кут нахилу рольганга, | 3 | 5 |
| Максимальна маса коробки, кг | 30 | 47 |
| Максимальна довжина каналу, мм | 30000 | 36000 |
| Крок перестановки ярусів по висоті, мм | 45 | 50 |
| Температурний режим, °С | - 30 до +45 | - 30 до +45 |
| Максимальна швидкість, м/с | 5 | 6 |

Можемо зробити висновки, що подібні системи підходять для роботи з будь-якими товарами, включаючи ті, які пред'являють підвищені вимоги до екологічності та гігієнічності обладнання – фармацевтичної і харчової продукції. Найкращих показників ефективності такі системи досягають при розміщенні на складах із високою завантаженістю й активним товарообігом. Таким чином, модернізуючи застаріле обладнання для виконання конкретних функцій шатлових систем, замінюючи окремі системи і агрегати обладнання, можна привести виробництво до сучасних стандартів Industry 4.0, в тому числі і з елементами кіберфізичних підходів, без величезних капітальних витрат.

Висновки

В статті представлено узагальнені результати аналізу компаній, що спеціалізуються на розробці,

впровадженні та обслуговуванні автоматизованих логістичних систем. Проведено обґрунтування вибору критеріїв модернізації та підвищення ефективності виробничої внутрішньоскладської логістики, за рахунок використання удосконалених автоматизованих модулів, з метою підвищення продуктивності та мобільності, зниження енерговитрат в системах автоматизації виробничої складської логістики. Основними критеріями, на які в найближчому майбутньому будуть направлені розробки в сфері автоматизації виробничої внутрішньої логістики є енергоощадливість, продуктивність, модульність, автономність. Тобто, автоматизація та удосконалення шатрових систем в логістиці, шляхом використання кіберфізичних підходів, один з найкоротших шляхів підвищення параметрів зменшення часу транспортування, сортування, зберігання та підвищення енергоефективності та гнучкості процесів внутрішньоскладської логістики.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ТОП-15 найбільших логістичних компаній України в 2023 році . Режим доступу: <https://wareteka.com.ua/uk/blog/logistichnih-kompanij-ukrayini-rejting/>
2. S. Zhu and G. Du, "Evaluation of the Service Capability of Maritime Logistics Enterprises Based on the Big Data of the Internet of Things Supply Chain System," in IEEE Consumer Electronics Magazine, vol. 12, no. 2, pp. 100-108, 1 March 2023, doi: 10.1109/MCE.2022.3150270.
3. Nevludov, I., Vzhesnievskiy, M., Romashov, Y. i Chala, O. (2023) «Математичне моделювання мехатронних шатлів як об'єктів автоматизації для багаторівневих систем внутрішньоскладської логістики», Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості, (4 (26), с. 135–144. doi: 10.30837/ITSSI.2023.26.135.
4. Топ 7 трендів у логістиці 2023 року. . Режим доступу: <https://haski.ua/blog/logistic/logistychni-trendy-2023-roku>
5. Перша українська спеціалізована платформа для гравців ринку складської логістики. Заголовок з екрану. Режим доступу: <https://wareteka.com.ua/uk/blog/logistichnih-kompanij-ukrayini-rejting/>
6. Портал відкритих даних. Офіційний портал. Режим доступу: <https://data.gov.ua/>
7. KAPELOU. Наші проекти. Офіційна сторінка KAPELOU. Заголовок з екрану. Режим доступу: <https://kapelou.com/>
8. Запроваджуйте інновації з SBRobotics. Змінюймо майбутнє разом! Режим доступу: <https://sbrobotics.ua/>
9. Sklad servis/ Офіційна сторінка/ Заголовок з екрану. Режим доступу: <https://ssk.ua/ua>
10. Yevsieiev, V., & et al. (2023). Conveyor Belt Object Identification: Mathematical, Algorithmic, and Software Support, Volume 17, No. 6 (Nov. 2023), PP:1073-1088 doi:10.18576/amis/170615
11. Nevludov Igor, Maksymova Svitlana, Chala Olena, Bronnikov Artem, & Vzhesnievskiy Maksym. (2023). Automated Logistics Processes Improvement in Logistics Facilities. Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 3(3), 157–170. Retrieved from <https://mjstjournal.com/index.php/mjst/article/view/202>
12. Sanchez Londono, D., Barbieri, G., Fumagalli, L.: Smart retrofitting in maintenance: a systematic literature review. J. Intell. Manuf. Intell. Manuf. 34(1), 1–1 (2023).
13. . Vladyslav Basiuk, Svitlana Maksymova, Olena Chala, & Olha Miliutina. (2023). Mobile Robot Position Determining Using Odometry Method. Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 3(3), 227–234. Retrieved from <https://mjstjournal.com/index.php/mjst/article/view/224>
14. Vladyslav Yevsieiev, Amer Abu-Jassar, & Svitlana Maksymova. (2024). OBJECT RECOGNITION AND TRACKING METHOD IN THE MOBILE ROBOT'S WORKSPACE IN REAL TIME. TECHNICAL SCIENCE RESEARCH IN UZBEKISTAN, 2(2), 115–124. Retrieved from <https://universalpublishings.com/index.php/tsru/article/view/4385>
15. Чала, О., Сливка, А. (2023) Рівні засобів ІІТ в інформаційних технологіях. Виробництво & Мехатронні Системи: матеріали VII Міжнародної конференції, Харків, С. 51-60.

Received (Надійшла) 12.01.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.04.2024

Automation of internal warehouse manufacturing logistics processes for the implementation of the industry 4.0 concept: energy saving, productivity, mobility, modularity, autonomy

M. Vzhesnievskiy, O. Chala

Abstract. The article examines the main trends and tasks faced by top companies whose main job profile is the development, implementation and support of internal warehouse logistics systems. In the near future development in the field of automation of production internal logistics will be directed on energy efficiency, productivity, mobility, modularity and autonomy. It has been proven that one of the main ways of improving production internal warehouse logistics processes is shuttle systems that can be modernized by using the concept of cyber-physical approaches. This is one of the shortest ways to increase the parameters of reducing the time of transportation, sorting, storage, and increasing the productivity, energy efficiency, and flexibility of production intra-warehouse logistics processes.

Keywords: automation, production, intra-warehouse logistics, INDUSTRY 4.0, autonomy, energy saving, modularity.

О. В. Запорожець, Н. В. Штефан, І. С. Яценко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ВИМІРЮВАННЯ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ СТАНДАРТІВ SQuaRE

Анотація. Якість є одним із факторів, що забезпечують комерційний успіх та безпеку використання програмного забезпечення. Під якістю розуміють відповідність явним і неявним вимогам різних зацікавлених сторін. Необхідно забезпечити спільне взаєморозуміння між розробниками та користувачами, інженери повинні розуміти значення поняття якості, характеристики та важливість якості для розробленого або підтримуваного програмного забезпечення. Основою забезпечення якості є вимірювання. Вони є основним інструментом керування життєвим циклом програмних продуктів, оцінки виконання планів і моніторингу. Для кількісного визначення якості необхідно виміряти характеристики програмного забезпечення. Стандартизація передбачає уніфікацію вимог до якості, її вимірювання та оцінки. Використання стандартів дає безліч потенційних переваг для будь-якої організації, особливо у таких ключових областях, як вимірювання якості програмних продуктів, інформаційних та вимірювальних систем. Визнані міжнародні організації із стандартизації опублікували серію стандартів ISO/IEC 25000 щодо вимог та оцінки якості систем та програмного забезпечення SQuaRE, яка набуває широкого практичного застосування. У статті обговорюється серія міжнародних стандартів SQuaRE, аналізується взаємозв'язок між моделлю якості, характеристиками якості, показниками якості та новою концепцією – елементом показника якості програмного забезпечення, представлено вимірювання якості на основі цих стандартів.

Ключові слова: якість, модель якості, програмне забезпечення, вимірювання, стандарт, показник якості.

Вступ

Комп'ютерні системи стали невід'ємною частиною життєзабезпечення сучасної людини. Наслідки використання неякісного програмного забезпечення можуть бути катастрофічними, починаючи від техногенних аварій, матеріальних втрат і небезпеки для людини і закінчуючи втратою іміджу компанії-розробника.

Якість програмного забезпечення – це здатність програмного продукту задовольняти заявлені та неявні потреби при використанні в певних умовах [1]. Тому дуже важливо забезпечити спільне розуміння між розробниками та користувачами. Інженери повинні чітко розуміти зміст, що вкладається в концепцію якості, характеристики та важливість якості для розробленого або підтримуваного програмного забезпечення. Формулювання чітких і зрозумілих вимог до якості ПЗ, а потім їх кількісна оцінка є одним із пріоритетних завдань забезпечення якості ПЗ.

Основою для забезпечення якості є вимірювання. Вони є основним інструментом для управління життєвим циклом програмних продуктів, оцінки виконання планів і моніторингу. Для кількісної оцінки якості необхідно виміряти характеристики програмного забезпечення.

Стандартизація забезпечує уніфікацію вимог до якості, її вимірювання та оцінки. Використання стандартів забезпечує багато потенційних переваг для будь-якої організації, особливо в таких ключових сферах, як вимірювання якості програмних продуктів та інформаційних і вимірювальних систем. Відповідно, доцільно аналізувати сучасні стандарти як основу для формування вимог до якості програмного забезпечення та вимірювання якості програмного забезпечення, що дозволить знизити ризики при розробці, впровадженні та супроводі програмного забезпечення. Актуальність даного питання підтвер-

джується також тим, що ці стандарти прийняті в Україні як національні.

Перші міжнародні стандарти в цій галузі були прийняті ще в 1991 році і з того часу неодноразово переглядалися. Сьогодні існує набір стандартів ISO/IEC 25000 SQuaRE – Systems and software Quality Requirements and Evaluation – логічно організована та уніфікована серія, що охоплює два основні процеси: специфікація вимог до якості програмного забезпечення та оцінка якості програмного забезпечення, що підтримується процесом вимірювання якості [2].

Модель якості SQuaRE

Стандарти SQuaRE включають п'ять основних розділів [1]: вимоги до якості 2503n, моделі якості 2501n, вимірювання якості 2502n, оцінка якості 2504n і управління якістю 2500n, а також розширення 25050–25099.

Стандарти ISO/IEC 25000 SQuaRE узгоджені з ISO/IEC/IEEE 15939 [3] за змістом, який визначає загальний процес і основу вимірювання систем і програмного забезпечення, а також відповідну термінологію з інженерної точки зору. Дотримуючись сучасних тенденцій ISO щодо гармонізації термінології, ISO/IEC/IEEE 15939 приймає та адаптує метрологічну термінологію, встановлену VIM [4] для стандартів програмної та системної інженерії. Наступні концепції з ISO/IEC/IEEE 15939 повністю відповідають, адаптовані або базуються на визначеннях з VIM: базова міра – заснована на визначенні «базової величини»; похідна міра – адаптована з визначення «похідної величини»; вимірювання – адаптовано; метод вимірювання – на основі визначення поняття «метод вимірювання»; процедура вимірювання – повністю відповідає; масштаб – на основі визначення «масштаб»; одиниця вимірювання – повністю відповідає.

Стандарти SQuaRE визначають моделі якості програмного забезпечення та систем, які використовуються для визначення вимог, розробки заходів та вимірювання якості.

Модель якості – це набір класів характеристик. Характеристики можна поділити на підхарактеристики, а в деяких випадках і на підпідхарактеристики. Вимірні властивості, пов'язані з якістю, називаються властивостями якості.

Властивості якості пов'язані з відповідними показниками якості.

Якість у стандартах SQuaRE описується чотирма моделями: модель якості у використанні та модель якості продукту, визначені стандартом ISO/IEC 25010, а також модель якості даних, визна-

чена ISO/IEC 25012, і модель якості IT-послуг, визначена ISO/IEC 25011.

Модель якості продукту зводить властивості якості до восьми характеристик, кожна з яких складається з ряду підхарактеристик (рис. 1) [5]. Ця модель якості продукту доповнюється моделлю якості у використанні, яка характеризує вплив продукту (системи або програмного продукту) на зацікавлених сторін. Якість у використанні визначається якістю програмного забезпечення, апаратного забезпечення, операційного середовища, а також характеристиками користувачів, задач і соціального середовища. Модель якості у використанні визначається через п'ять характеристик, пов'язаних з результатами взаємодії з системою (рис. 2) [5].

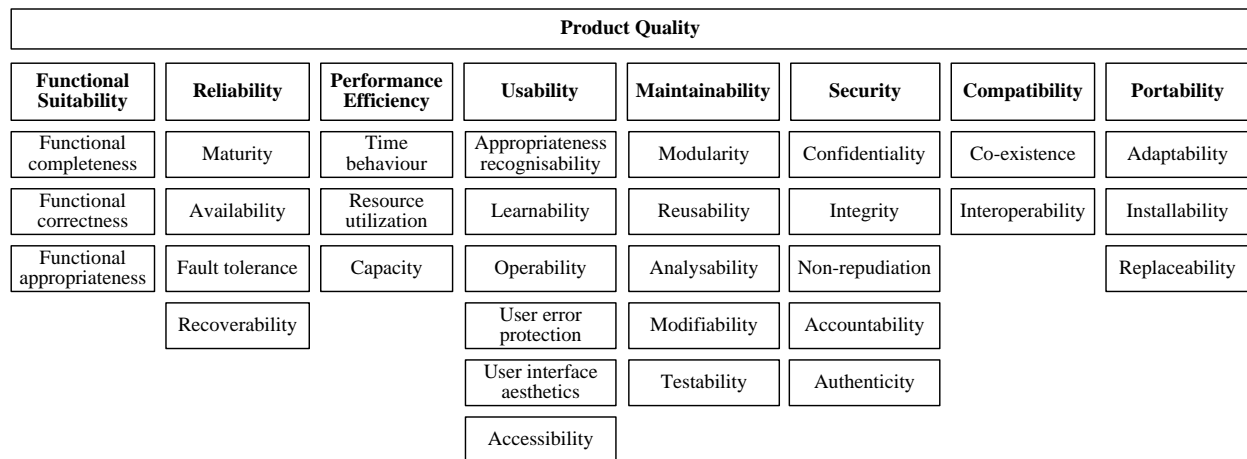


Рис. 1. Модель якості продукту

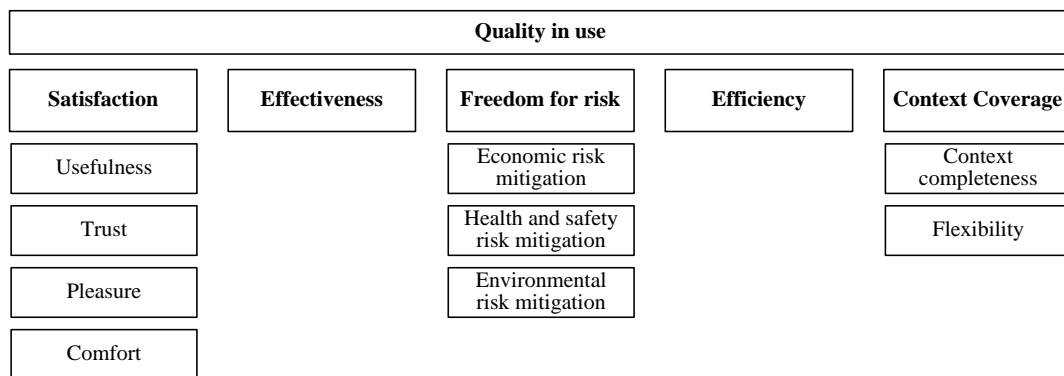


Рис. 2. Модель якості у використанні

Моделі якості продукту та якості у використанні можна використовувати для визначення вимог, генерування метрик та оцінювання якості. Визначені характеристики якості можна використовувати як контрольний список для детального вивчення вимог до якості, таким чином забезпечуючи основу для оцінки подальших зусиль і дій, необхідних у процесі розробки системи.

Розділ вимірювання якості SQuaRE

Розділ вимірювання якості (2502n) включає шість стандартів:

– ISO/IEC 25020 – структура вимірювання якості: забезпечує основу для вимірювання якості;

– ISO/IEC 25021 – елементи вимірювання якості: надає формат для визначення ЕПЯ (елементів показників якості) і кілька прикладів ЕПЯ, які можна використовувати для побудови показників якості програмного забезпечення;

– ISO/IEC 25022 – вимірювання якості у використанні: забезпечує вимірювання, включаючи пов'язані функції вимірювання для характеристик якості в моделі якості у використанні;

– ISO/IEC 25023 – вимірювання якості системи та програмного продукту: надає показники, включаючи пов'язані функції вимірювання та елементів показників якості для характеристик якості в моделі якості продукту;

– ISO/IEC 25024 – вимірювання якості даних: забезпечує вимірювання, включаючи пов'язані функції вимірювання та ЕПЯ для характеристик якості в моделі якості даних;

– ISO/IEC 25025 – вимірювання якості ІТ-послуг: надає показники для моделі якості ІТ-послуг.

Практичне використання моделі вимірювання якості SQuaRE

ISO/IEC 25020 забезпечує основу для розробки показників якості [6]. Вимірювання якості програмного забезпечення базується на двох поняттях: показник якості та елемент показника якості. Еталонна модель вимірювання якості описує зв'язок між моделлю якості та побудовою показників якості з елементів показників якості (рис. 3).

Властивості якості вимірюються за допомогою методу вимірювання. Метод вимірювання – це логі-

чна послідовність операцій, що використовується для кількісного визначення властивостей відносно конкретної шкали. Результатом застосування методу вимірювання є елементи показника якості. Характеристики та підхарактеристики якості можна кількісно визначити за допомогою функції вимірювання. Функція вимірювання – це алгоритм, який використовується для об'єднання елементів показника якості. Показники якості будуються шляхом застосування функції вимірювання до набору елементів показника якості. Результат використання функції вимірювання називається показником якості програмного забезпечення.

Таким чином, показники якості програмного забезпечення стають кількісними індикаторами якісних характеристик і підхарактеристик. Для вимірювання характеристики або підхарактеристики якості можна використовувати кілька показників якості програмного забезпечення.

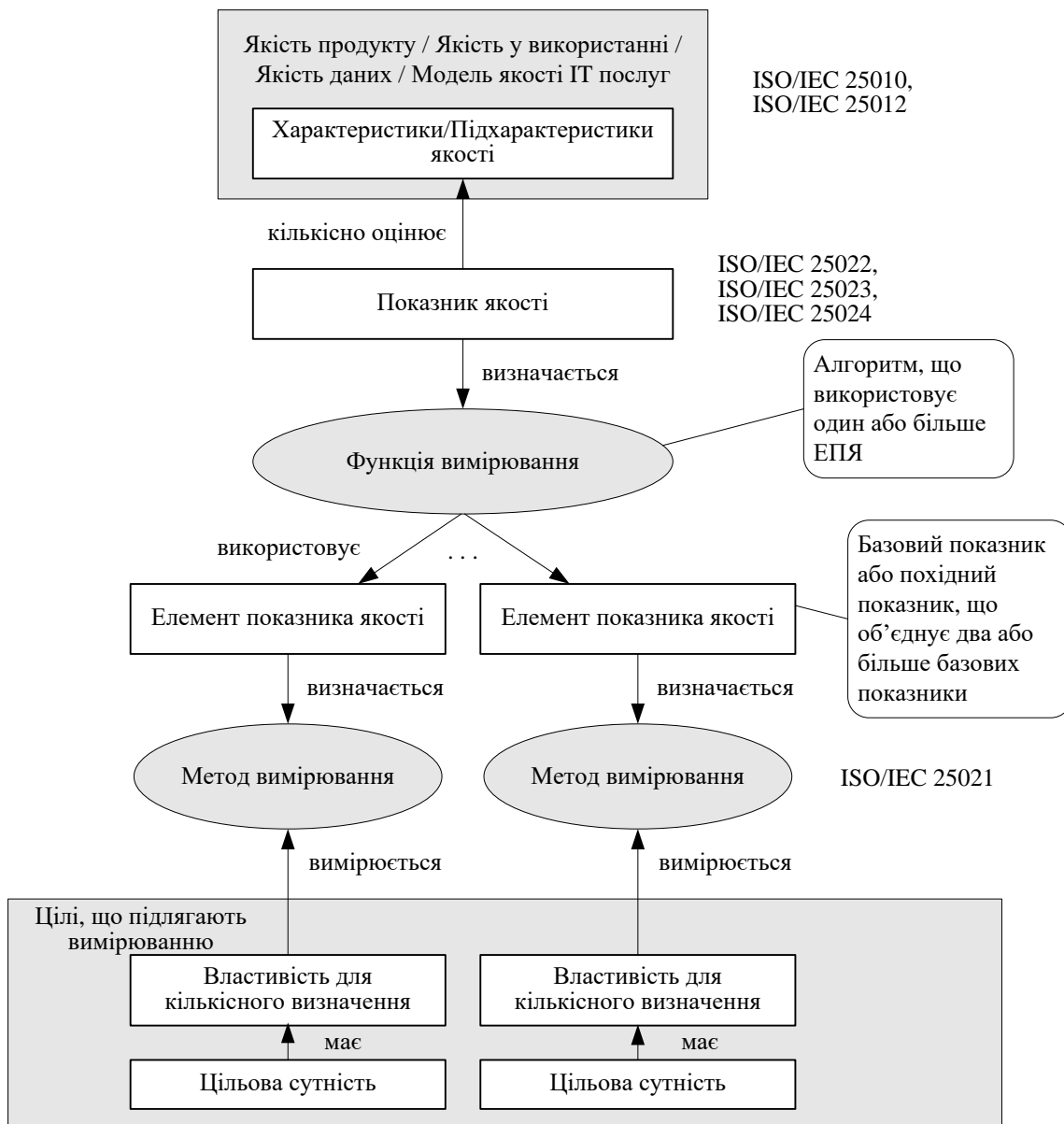


Рис. 3. Зв'язок між моделлю якості, показниками якості, елементами показників якості, властивостями для кількісного визначення, цільовими сутностями

ISO/IEC 25022 [7], ISO/IEC 25023 [8], ISO/IEC 25024 [9] надають набір показників якості для характеристик систем/програмних продуктів в моделях якості у використанні та якості продукту, визначених ISO/IEC 25010, і в моделі якості даних, визначеній ISO/IEC 25012. Ці показники якості можна використовувати для визначення вимог, вимірювання та оцінки якості системи/програмного продукту. Виходячи з задачі вимірювання, показники якості вибираються зі стандартів ISO/IEC 25022, ISO/IEC 25023, ISO/IEC 25024, щоб задовольнити потреби розробників, покупців, менеджерів, прямих і непрямих користувачів та інших зацікавлених сторін. Крім того, включаються функції вимірювання для кожного запропонованого показника якості, підсумковий розгляд використання показника якості та елементів показника якості.

Елементи показника якості представлені ISO/IEC 25021 [10].

На основі аналізу моделі якості SQuaRE та розділу вимірювання якості запропоновано алгоритм вимірювання якості програмного забезпечення:

1) визначити моделі якості за стандартами ISO/IEC 25010, ISO/IEC 25012 для ідентифікації відповідних характеристик якості програмного забезпечення;

2) вибрати показники якості для кожної характеристики якості з використанням ISO/IEC 25022, ISO/IEC 25023, ISO/IEC 25024;

3) вимірювати елементи показника якості, використовуючи методи вимірювання з стандарту ISO/IEC 25021;

4) вибрані показники якості будуються шляхом застосування функції вимірювання до елементів показника якості.

У таблиці 1 наведено приклади застосування стандартів SQuaRE для вимірювання деяких показників якості програмного забезпечення.

Таблиця 1 – Приклади застосування стандартів SQuaRE для вимірювання якості програмного забезпечення

| Характеристики / підхарактеристики якості | Показник якості. Опис | Функція вимірювання | Елемент показника якості | Метод вимірювання |
|---|---|---|------------------------------------|---|
| Функціональна повнота | Функціональне покриття. Яку частину вказаних функцій реалізовано? | $X = 1 - A / B,$ A – кількість відсутніх функцій, B – кількість передбачених функцій | Кількість доступних функцій | Перегляд та аналіз окремих функцій програмного забезпечення, доступних користувачеві для виклику та виконання, а також підрахунок кількості функцій, які не вдалося успішно використати |
| Часові характеристики | Середній час відповіді. Скільки в середньому часу потрібно системі, щоб відповісти на задачу користувача або системну задачу? | $X = \sum_{i=1}^n A_i / n,$ A_i – час, який витрачає система на відповідь на конкретну задачу користувача або системну задачу при i -му вимірюванні, n – кількість виміряних відповідей | Тривалість | Тривалість залежить від загальної кількості часу і прив'язана до Міжнародної системи одиниць (VIM) |
| Здатність до навчання | Повнота настанови користувача Яка частина функцій описана достатньо детально в документації користувача та/або в довідковому центрі, щоб користувач міг застосовувати функції? | $X = A / B,$ A – кількість функцій, описаних у документації користувача та/або довідковому центрі, якщо потрібно, B – кількість реалізованих функцій, які необхідно задокументувати | Кількість задокументованих функцій | Перегляд та аналіз окремих функцій системи/програмного забезпечення, доступних для виклику та виконання користувачем з обмеженими можливостями, а також підрахунок кількості функцій, описаних у документації користувача |
| Завершеність | Інтенсивність відмов. Яка середня кількість відмов виникає протягом визначеного періоду? | $X = A / B,$ A – кількість відмов, виявлених за час спостереження, B – тривалість спостереження | Кількість відмов | Підрахунок кількості відмов, що виникали протягом заданого часу спостереження |

Висновки

Розділ моделей якості 2501n стандартів SQuaRE описує моделі якості програмного забезпечення, які підтримують чітке визначення вимог до якості програмного забезпечення.

Характеристики в моделі якості у використанні та моделі якості продукту призначені для використання як набір у специфікації або оцінці якості програмного продукту або комп'ютерної системи. Слід зауважити, що номенклатура показників якості конкретного програмного продукту або системи, які підлягають вимірюванню, не обов'язково повинна включати весь набір характеристик/підхарактеристик відповідної моделі якості.

Ця номенклатура буде визначатися перш за все метою дослідження, важливістю чи критичністю тих чи інших характеристик/підхарактеристик для програмного забезпечення конкретного типу, призначення, умов застосування тощо.

Вимірювання якості програмного забезпечення базується на двох поняттях: показник якості та еле-

мент показника якості. Еталонна модель вимірювання якості описана в стандарті ISO/IEC 25020, який створює методологічну основу для процедури вимірювання якості програмних продуктів та систем.

Стандарти ISO/IEC 25022, ISO/IEC 25023, ISO/IEC 25024 визначають показники якості та функцію вимірювання для кожної характеристики якості моделі.

Функція вимірювання пов'язує показники якості з елементами вимірювання якості, які безпосередньо вимірюються.

Досить широкий перелік елементів показників якості містить стандарт ISO/IEC 25021.

Основними перевагами серії стандартів SQuaRE є те, що вони надають методики координації для вимірювання та оцінки якості програмних продуктів, настанови із специфікації вимог до якості програмного продукту та гармонізацію зі стандартом ISO/IEC/IEEE 15939 у формі еталонної моделі вимірювання якості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ISO/IEC 25000:2014 Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). Guide to SQuaRE.
2. Kazuhiro Esaki. Introduction of Quality Requirement and Evaluation Based on ISO/IEC SQuaRE Series of Standard. Global Perspectives on Engineering Management. May 2013, Vol. 2 Iss. 2, pp. 52-59.
3. ISO/IEC/IEEE 15939:2017 Systems and software engineering. Measurement process.
4. JCGM 200:2012. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM).
5. ISO/IEC 25010:2023 Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). Product quality models.
6. ISO/IEC 25020:2019 Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). Quality measurement framework.
7. ISO/IEC 25022:2016 Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). Measurement of quality in use.
8. ISO/IEC 25023:2016 Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). Measurement of system and software product quality.
9. ISO/IEC 25024:2016 Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). Measurement of data quality.
10. ISO/IEC 25021:2016 Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). Quality measure elements.

Received (Надійшла) 19.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.04.2024

Software quality measurement based on SQuaRE standards

O. Zaporozhets, N. Shtefan, I. Yatsenko

Abstract. Quality is one of the factors that ensure the commercial success and safety of software use. Quality means compliance with the explicit and implicit requirements of various stakeholders. A common understanding between developers and users must be ensured, and engineers must understand the meaning of quality, the characteristics, and the importance of quality for the developed or maintained software. The basis of quality assurance is measurement. They are the main tool for managing the life cycle of software products, evaluating the implementation of plans and monitoring. To quantify quality, it is necessary to measure the characteristics of the software. Standardization involves the unification of quality requirements, its measurement and evaluation. The use of standards provides many potential benefits for any organization, especially in such key areas as measuring the quality of software products, information and measurement systems. Recognized international standardization organizations have published the ISO/IEC 25000 series of standards on requirements and quality assessment of SQuaRE systems and software, which is gaining wide practical application. The article discusses the SQuaRE series of international standards, analyzes the relationship between the quality model, quality characteristics, quality indicators and a new concept - the software quality measure element, and presents quality measurement based on these standards.

Keywords: quality, quality model, software, measurement, standard, quality measure.

Л. І. Леві, М. К. Бороздін, О. С. Ястреба

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

ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНАТОРНО-ГРАФОВОГО ПІДХОДУ ДО ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ІНЖЕНЕРНИМИ МЕРЕЖАМИ

Анотація. При дослідженні інженерних мереж (ІМ) як об'єктів оперативного управління попередньо було виконано певні розробки та при цьому було отримано такі результати. Здійснено формалізацію структури та функціональних елементів оперативного керування ІМ та зроблено постановку узагальненої задачі оперативного управління такими об'єктами. Розроблено систему показників для оцінки керуючих алгоритмів, що породжуються відомими методами реалізації поставленої узагальненої задачі оперативного управління ІМ. Проведено аналіз керуючих алгоритмів, що породжуються узагальненою задачею, з використанням для цієї мети системи показників для оцінки керуючих алгоритмів. Показано, що відомі методи реалізації узагальненого завдання оперативного управління ІМ не дозволяють отримати ефективні керуючі алгоритми. На підставі цього зроблено висновок про необхідність таких нових підходів до управління ІМ, які б враховували суттєві структурні та функціональні особливості об'єктів управління класу, що розглядається, і породжували ефективні алгоритми оперативного управління. Ці результати використані у даній роботі щодо ІМ в аспекті оперативного управління такими об'єктами.

Ключові слова: інженерна мережа, моделюючий граф, поточкорозподіл, активний елемент, евристики, комбінаторно-графовий підхід.

Вступ

Постановка проблеми. Відомі певні способи реалізації процесів управління ІМ, що використовують різні методи розрахунку поточкорозподілів, що встановилися в інженерних мережах. До них, зокрема, належать:

- метод Ньютона,
- модифікований метод Ньютона,
- метод Лобачова-Кроса,
- узагальнений метод Ньютона,
- метод покоординатного спуску,
- метод сполучених напрямів Флетчера-Рівса,
- метод змінної метрики Девідона-Флетчера-Пауелла [1].

Практична реалізація керуючих процесів, заснованих на перерахованих методах, зустрічає наступні проблеми [2, 3].

1. Необхідний дуже великий обсяг ОП керуючої ЕОМ для зберігання даних, що беруть участь у обчислювальному процесі: апріорної інформації про параметри всіх дуг ІМ і робочої інформації – проміжних величин, що використовуються в обчислювальному процесі.

2. Необхідні значні витрати процесорного часу керуючої ЕОМ для виконання дуже великої кількості ітерацій з метою розрахунку керуючих впливів, що забезпечують необхідний поточкорозподіл.

Формулювання мети статті. Виходячи з попереднього аналізу, в даній роботі пропонується інший підхід до управління ІМ, безпосередньо не пов'язаний з необхідністю розрахунків встановлених поточкорозподілів в ІМ.

Будучи комбінаторно-графовим, запропонований підхід враховує суттєві структурні та функціональні особливості об'єктів управління розглядуваного класу.

Цим він дозволяє суттєво зменшити обсяг ОП та скоротити кількість процесорного часу керуючої ЕОМ, необхідних для формування керуючих впливів у інженерних мережах.

Основна частина

Для розгляду запропонованого в даній роботі комбінаторно-графового підходу до управління ІМ введемо наступні поняття та позначення.

Множину вершин графа G , що відповідає вузлам ІМ N , підключеним до активного елемента (АЕ), позначимо A і назовемо множиною вхідних вершин графа G . У реальних ІМ вхідними вершинами є лише деякі з множини всіх вершин V . Тому вважатимемо, що між множиною вхідних вершин A та множиною всіх вершин V має місце таке співвідношення: $A \subset V$. Певний АЕ, який бієктивно відповідає вхідній вершині x , позначимо S_x , де $x \in A$. Відповідно до математичної моделі поточкорозподілу в ІМ [1 – 3], в результаті функціонування АЕ S_x створюються певні напори (рівні) цільового продукту (ЦП) Z_y у вершинах y , де $x \in A, y \in V$.

Кожній дузі $j \in E$ моделюючого графа G поставимо у відповідність величину l_j , що формалізує гідравлічний або аеродинамічний опір відповідної ділянки розглядуваної ІМ N .

Існують різні способи розрахунку значень l_j для реальних ІМ. Ці величини також можуть бути визначені у процесі ідентифікації ІМ як об'єктів оперативного управління [3, 4].

Нехай вершини $x, y \in V$ моделюючого графа G зв'язані ланцюгом P_{xy} .

Тоді довжина ланцюга P_{xy} , що виражає опір відповідної ділянки ІМ N , може бути визначена співвідношенням:

$$L_{xy} = \sum_{j \in P_{xy}} l_j.$$

У загальному випадку розглянуті вершини $x, y \in V$ графа G можуть бути зв'язані кількома ланцюгами P_{xy} , що обумовлено наявністю декількох ділянок в ІМ N , що з'єднують відповідні вузли. Тоді найкоротшим ланцюгом K_{xy} назовемо такий ланцюг P_{xy} , який має найменшу довжину L_{xy} .

Довжину L_{xy} найкоротшого ланцюга K_{xy} позначимо M_{xy} .

Величина M_{xy} визначається наступним співвідношенням:

$$M_{xy} = \min \{L_{xy}\}.$$

Моделюючий граф G топологічної структури ІМ N , який формалізує комбінаторно-графовий підхід до управління об'єктом розглядуваного класу, наведено на рис. 1.

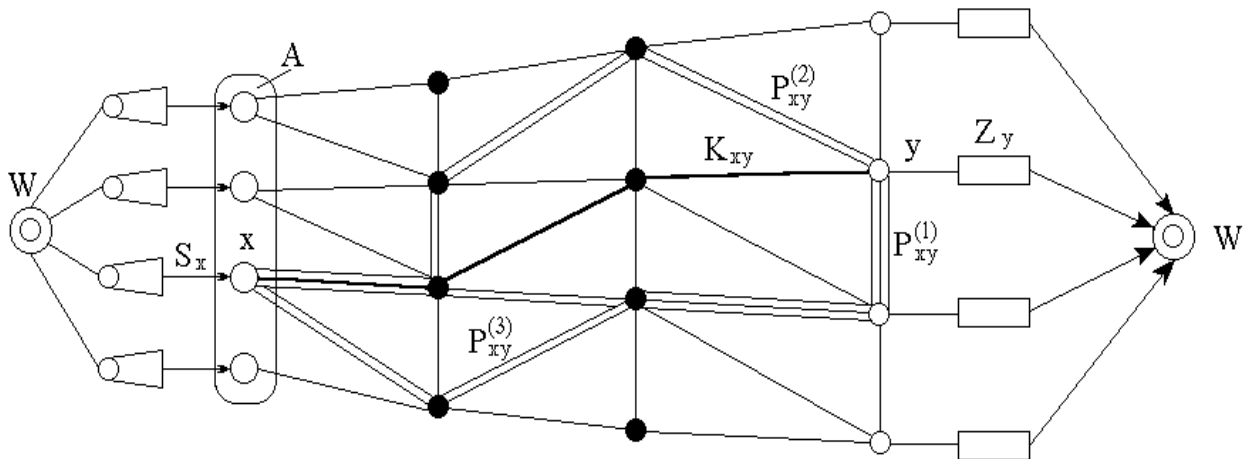
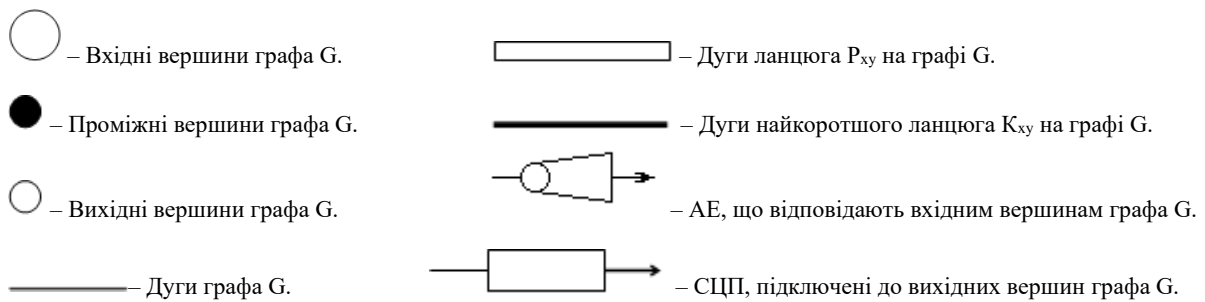


Рис. 1. Моделюючий граф G топологічної структури ІМ N , який формалізує комбінаторно-графовий підхід до управління об'єктом розглядуваного класу:



Виходячи з математичної моделі поточкорозподілу в ІМ N , процес управління об'єктом розглядуваного класу включає цілеспрямовані впливи на всі або деякі АЕ S_x , де $x \in A$, для реалізації необхідних змін напорів (рівнів) ЦП Z_y , де $y \in V$, відповідно до певних критеріїв управління [1 – 3].

Для реалізації процесу управління ІМ у цьому підрозділі пропонується використовувати такі евристики.

1. Для зміни величини Z_y необхідно насамперед використовувати ті АЕ S_x , які найефективніше впливають на величину Z_y , де $x \in A, y \in V$.

2. Ступінь впливу АЕ S_x на величину напору Z_y характеризуватимемо довжиною M_{xy} найкоротшого ланцюга K_{xy} з вершини x у вершину y , де $x \in A, y \in V$. При цьому чим менша довжина найкоротшого ланцюга, тим ступінь впливу певного АЕ на напор (рівень) ЦП у розглядуваній вершині вважається більшою.

Справедливість даних евристик обумовлена співвідношеннями, що встановлюють взаємозв'язки між керуючими змінними та параметрами поточкорозподілів, що встановилися в ІМ.

Відповідно до специфіки математичної моделі поточкорозподілу в ІМ дані евристики сприяють зменшенню енергетичних витрат при створенні

допустимих умов функціонування для споживачів цільового продукту (СЦП), підключених до розглядуваної ІМ. Це сприяє реалізації узагальненого задачі оперативного управління в розглядуваній ІМ.

Запропонований комбінаторно-графовий підхід до управління ІМ формалізуємо наступним чином.

Нехай множини V і A містять відповідно v і a вершин: $|V| = v, |A| = a$.

З умови $A \subset V$ випливає, що $a < v$.

Не зменшуючи спільності, всі вершини множини V занумеруємо v послідовними натуральними числами так, що перші a з них відповідають підмножині $A \subset V$.

Оскільки кожній вхідній вершині $x \in A$ біктивно відповідає АЕ S_x , з'єднаний з розглядуваною вхідною вершиною, будемо вважати, що кожний АЕ S_x має номер, що відповідає вхідній вершині D_y . В цьому випадку всі АЕ S_x будуть так само, як і вхідні вершини $x \in A$, занумеровані першими a натуральними числами.

Для кожної вершини $y \in V$ упорядкуємо множини номерів усіх АЕ S_x за ступенем їх впливу на величину Z_y , де $x \in A$.

Ступінь впливу АЕ S_x на величину Z_y відповідно до прийнятих евристик оцінюватимемо довжиною M_{xy} найкоротшого ланцюга K_{xy} , де $x \in A, y \in V$.

Для цього кожній вершині $u \in V$ поставимо у відповідність вектор D_u , координатами якого є номери всіх АЕ S_x , упорядковані за зростанням величини M_{xu} , де $x \in A$.

Такий вектор назвемо вектором упорядкування номерів АЕ за ступенем їхнього впливу на величину Z_u у вершині $u \in V$.

Розмірність вектора D_u для кожної вершини $u \in V$, яка визначається числом його координат, дорівнює загальній кількості АЕ а аналізованої ІМ N.

Вектор D_u може бути використаний для визначення тих АЕ S_x , на які потрібно впливати в першу чергу при необхідності зміни величини Z_u у вершині у у процесі управління ІМ N де $x \in A$, $u \in V$.

Сукупність векторів D_u для всіх вершин $u \in V$ утворює матрицю $D = \{D_u\}$. Матрицю D назвемо матрицею упорядкування АЕ S_x , де $x \in A$, за ступенем їхнього впливу на напори Z_u у всіх вершинах $u \in V$ графа G.

Кожним рядком матриці D є вектор D_u , що відповідає певній вершині $u \in V$. Тому число елементів у рядку матриці D , що визначає кількість її стовпців, відповідає розмірності вектора D_u і дорівнює числу a .

Число рядків матриці D визначається кількістю всіх вершин u , що входять до множини V , і тому дорівнює числу v . Отже, матриця D має розмірність $v \times a$.

Матриця D формалізує запропонований у цьому підрозділі комбінаторно-графовий підхід до управління ІМ N.

Висновки

Запропонований комбінаторно-графовий підхід може бути використаний при синтезі систем, що реалізують процеси управління ІМ розглядуваного класу.

На відміну від відомих способів управління, заснованих на чисельних методах розрахунку потоко-розподілів в ІМ, запропонований підхід у загальному випадку не забезпечує оптимального управління об'єктами розглядуваного класу. Проте він враховує суттєві структурні та функціональні особливості таких об'єктів.

Це дозволяє порівняно з відомими методами значно зменшити необхідний обсяг оперативної пам'яті та скоротити необхідну кількість процесорного часу керуючої ЕОМ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткачук О.А. Міські інженерні мережі: Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2015. – 412 с.
2. Визначення потокорозподілу в мережах з переважаною деревоподібною структурою графа на основі потенціалу в середній точці гілок-хорд / С.Д. Винничук // Режим доступу: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/handle/123456789/133524>
3. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
4. Леві Л.І. Інтелектуальні інформаційні технології в ідентифікації і керуванні складними технічними об'єктами в умовах невизначеності: [монографія]. – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2021. – 194 с.

Received (Надійшла) 14.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.04.2024

Application of the combinator-graphic approach to the operational management of engineering networks

L. Lievi, M. Borozdin, O.Yastreba

Abstract. Based on special sociological studies, it has been established that achieving a high level of engineering support for residential buildings, as well as household enterprises and institutions, helps to improve the sanitary and hygienic level, has an extremely beneficial effect on the health of the population and on labor productivity, thus contributing to the solution of important national economic problems. The most important aspect of this problem is improving the functioning of modern urban water supply and gas supply systems to ensure the required regimes of water and gas consumption by household facilities, as well as social and cultural facilities. The need to further improve agricultural production and improve the life of the rural population puts forward increased demands on the implementation of the processes of functioning of irrigation systems, as well as agricultural water supply systems. The need to further improve agricultural production and improve the life of the rural population puts forward increased demands on the implementation of the processes of functioning of irrigation systems, as well as agricultural water supply systems. During the study of engineering networks (EN) as objects of operational management, certain developments were previously carried out and the following results were obtained. 1. The formalization of the structure and functional elements of operationally managed ENs was carried out and the generalized task of operational management of such objects was formulated. 2. A system of indicators has been developed for the evaluation of control algorithms generated by known methods of implementation of the set generalized task of operational management of EN. 3. An analysis of control algorithms generated by a generalized problem was carried out, using for this purpose a system of indicators for evaluating control algorithms. 4. It is shown that the known methods of implementing the generalized task of operational management of EN do not allow obtaining effective control algorithms. On the basis of this, a conclusion was made about the need for such new approaches to EN management, which would take into account the essential structural and functional features of management objects of the class under consideration, and generate effective operational management algorithms. These results are used in this work on EN in the aspect of operational management of such objects.

Keywords: engineering network, modeling graph, flow distribution, active element, heuristics, combinatorial-graph approach.

A. Trystan¹, D. Zhukov¹, A. Berezhnyi²

¹ State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Cherkasy, Ukraine

² Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

MODELS OF THE SYSTEM OF COLLECTIVE SELF-ORGANISATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Abstract. The article examines the current state and trends in the development of unmanned aerial vehicles (hereinafter - UAVs), methods and means of their control, self-organisation, flight routing, as well as the involvement of artificial intelligence technologies in the UAV teams system. The main trends in the use of UAVs in the defence sector are analysed. The key problems in this area are highlighted, as well as the shortcomings of existing methods and systems. The article analyses scientific works of domestic and foreign scholars, studies problematic issues and suggests ways of their solution. The introduction of artificial intelligence into the UAV control system has significant potential and makes the development of these technologies urgent. The development of UAV collective control systems, including those using artificial intelligence, allows for the effective use of technology in various fields, ensuring increased coordination, functionality and overall efficiency. At the same time, despite active research in this area, a number of problems related to the development of methods and algorithms for group work still remain unresolved. The issue of integrating information technologies created on their basis and the specifics of their implementation in collective intelligence systems in order to increase the efficiency of solving complex formalised tasks is not sufficiently studied. A method of self-organisation of the UAV team with decentralised control is proposed, in which a number of functions (route planning, distribution of roles, determination of optimal actions, obtaining and processing information) assigned to the onboard control system of the robotic air complex can be performed by each element of the UAV team system due to their self-organisation. The practicality of this method lies in the fact that the UAV's artificial intelligence will constantly self-learn and improve, and if necessary, can be reprogrammed to meet the required conditions of the task. As a consequence, the results and time required to complete missions will improve significantly, while the number of control operators will decrease. It solves a number of problems and shortcomings related to the organisation of the management system, route planning, distribution of roles, speed and completeness of receiving, processing and transmitting information, which in turn improves the security and performance of the system.

Keywords: agents, algorithms, artificial intelligence, aviation complex, division of roles, collective, coordination, control, information technology, multi-agent systems, routing, self-organisation, self-training, swarm, unmanned aerial vehicle.

Introduction

Relevance (Problem statement). Building models of the UAV collective self-organisation system is a very relevant topic in today's realities. In the context of the armed aggression of the Russian Federation, the need to develop and modernise UAVs, their control systems, improve tactical and technical characteristics, and introduce innovative technologies has intensified.

UAVs are used in all spheres of modern society, including agriculture, electricity, geodesy and cadastre, oil and gas mining, security, construction, forestry and road maintenance, as well as in law enforcement agencies, including the armed forces of states. This paper focuses on the implementation of the UAV collective self-organisation system in the security and defence system.

The relevance of the chosen research topic lies in the constant scientific and technological progress, the development of robotics and information technology (hereinafter - IT). Over the past few years, the technology of unmanned aerial vehicles has seen continuous technological development, from being used in the important defence sector to being used in all other areas. According to Globe Newswire, the global military drone market is projected to reach USD 23.78 billion by 2027 [1].

The introduction of artificial intelligence (AI) into the UAV control system has significant potential and makes the development of these technologies urgent. The use of AI in UAV systems allows for quick and adaptive decisions in changing circumstances. This is especially important for real-time tasks, such as threat detection or

navigation in low visibility conditions. AI allows UAVs to efficiently and quickly process large amounts of data received from sensors and cameras. This improves the capabilities of reconnaissance, object detection and information analysis over large areas. In addition, the introduction of the method of collective use and control into the UAV control system allows UAVs to perform their tasks more efficiently by coordinating their actions together. In the military sphere, UAV collective control systems can serve to increase tactical flexibility and coordinate military operations. Ensuring synchronisation of actions, they can perform complex military tasks.

The development of UAV collective control systems, including the use of AI, allows for the efficient use of technology in various fields, ensuring increased coordination, functionality and overall efficiency.

Analysis of the latest research and publications

In their article "Organisation of the work of a group of unmanned aerial vehicles", Golebo V. A. and Melnikov R. G. considered the basic theories and algorithms that help to achieve joint coordinated actions of a group of objects, and proposed an algorithm for avoiding possible collisions between neighbouring UAVs by recalculating the flight path [2].

In their research article "Methods for solving tasks of planning agent behaviour in intelligent decision support systems", A. Berezhnyi, M. Soroka, and N. Salo determined that the tasks of planning agent behaviour in the environment of a decision-making/decision support system characterised by high dynamism require special

flexibility of intelligent agent methods. In such systems, it is impossible or insufficient to find only a static plan, it is necessary to dynamically adapt some initial plan to a dynamic environment and, possibly, a dynamic goal directly upon receipt of new information, i.e., the development of the methods specified in this subsection lies in the plane of building methods of dynamic and adaptive planning [3].

In 2020, in his dissertation on "Methods and Information Technology for Automated Planning of UAV Flight Routes to Increase the Efficiency of Object Search", A. Berezhnyi solved the urgent scientific and technical task of developing methods and information technology for automated planning of UAV flight routes to increase the efficiency of object search [4].

In their monograph, Pogudina O. K., Krytskiy D. M., Bykov A. M., Plastun T. A., Pivovarov M. V. on the topic "Methodology for the formation of the intellectual component of the agent system of a swarm of unmanned aerial vehicles", new scientific and practical justifications were formed, which together solve an important scientific task, which is to increase the efficiency of UAVs in performing various tasks by controlling swarm intelligence using the provisions of graph theory, multi-agent modelling and existing stereotypes of adaptive behaviour of swarm participants [5].

Demidov B. O., Borysenko M. V., Kucherenko Y. F., Zadorozhna A. Y. in their article "Perspective directions of development and application of artificial intelligence methods and technologies for the Armed Forces of Ukraine within the framework of implementation of modern innovations in the military sphere" consider priority directions and main tasks of development and application of artificial intelligence methods and technologies in the defence sector. The authors argue that in complex, poorly formalised or non-formalised management situations that cannot be interpreted within strict schemes, the use of AI becomes necessary to support the processes of effective management of activities in the defence sector, including the Armed Forces of Ukraine (hereinafter - the AFU). According to the concept of AI development, priority areas of activity are proposed for the foreseeable future, which are included in the strategic programme of measures in the field of development and implementation of AI technologies for use in the AFU [6].

Professor Nurul I. Sarkar in his paper "Artificial Intelligence-Based Autonomous UAV Networks" presented a comprehensive overview of autonomous UAV networks based on artificial intelligence. Conducted a thorough analysis of more than 100 articles on UAVs, including classification of autonomous functions, management and scheduling of network resources, multiple access and routing protocols, as well as power control and energy efficiency of UAV networks. A review and analysis of the literature on UAV networks has shown that AI-based UAVs are a technologically feasible and economically viable paradigm for the cost-effective design and deployment of such next-generation autonomous networks. This article identifies open research challenges in the emerging field of UAV networks [7].

Yograj Singh Mandloi & Yoshinobu Inada's research focuses on applying machine learning and neural networks to select actions and better understand the environment to control unmanned aerial vehicles, rather than using explicit models to achieve the same goal. Implementations of machine learning and deep learning algorithms, such as nonlinear regression, have been combined with neural networks to study the system dynamics of the drone to predict future states [8].

Shreyamsh Kamate and Nuri Yilmazer in their article obtained information using UAVs used to detect and track moving objects. The main goal of this research is to assist operators by implementing intelligent visual surveillance systems that help detect and track suspicious or unusual events in a video sequence [9].

Mustapha Bekhti, Marwen Abdennebi, Nadjib Achir, Khaled Boussetta in their article investigated the route planning of autonomous UAVs with tracking capabilities provided by ground-based wireless networks. They formalised this problem as a constrained shortest path problem, where the goal is to minimise the delay in reaching the destination while ensuring a certain delivery rate of UAV location messages [10].

In their 2021 research article, Zain Anwar Ali, Zhangang Han, and Rana Javed Masood proposed collective motion control and self-organisation of a swarm of 10 UAVs, which are divided into two clusters of five agents each. In this paper, we develop a 3D model of the entire environment using graph theory. To solve the above problems, this paper develops a hybrid metaheuristic algorithm by combining particle swarm optimisation (PSO) with a multi-agent system (MAS) [11].

In the research article "Nature-inspired self-organising collision avoidance for drone swarm based on reward-modulated spiking neural network", the authors build a model of obstacle avoidance for a swarm of drones based on the decentralised, self-organised method of swarm behaviour in nature. Each individual uses a spiking neural network with reward modulated bursts for autonomous learning and makes decisions based on local observations. The result is a swarm of drones with safe flight behaviour. This work demonstrates the biological plausibility of the mechanism of learning and cognitive behaviour, and provides a basis for the development of swarm intelligence [12].

The article aims to analyse existing methods of UAV self-organisation based on artificial intelligence and describe the communication of UAV team self-organisation for poorly formalised tasks (missions).

The solution

Methods for improving and implementing innovative technologies in UAVs' collective self-organisation systems have been studied by domestic and foreign scientists relatively recently [5,7,10,11]. Numerous scientific articles propose solutions to problematic issues in the field of AI application in UAV control systems, building a control system based on various systems and platforms, for example, using multi-agent systems. At the same time, there are still many gaps and shortcomings, methods to improve the already proposed research results.

One of the most pressing topics of current discussions and research is the improvement of the effectiveness of tasks, including combat ones, by robotic systems. During the armed aggression of the Russian Federation, special attention was focused on the use of UAV systems in combat, which was due to several significant reasons. Firstly, aerial reconnaissance and other units of the AFU demonstrated high combat results in performing tasks of varying complexity and nature. Secondly, we can see the high technical potential and relative safety of UAV operators during missions, as well as the economic feasibility of their use.

The military use of robotic systems has become an integral part of the armed forces of states in modern warfare strategies. UAVs are used to perform combat missions, such as distracting air defence systems, destroying military targets, equipment, enemy personnel, military infrastructure, as well as conducting aerial reconnaissance and monitoring of combat operations, coordinating and managing units, and delivering medicines and other important cargo. Unmanned aerial systems will continue to be used in various military operations due to their high effectiveness in performing combat missions, reducing losses, and because they can perform highly specialized and long-term missions. First of all, in order to understand the research problem, it is necessary to analyse and build a sequential series of UAV systems development (schematically shown in Fig. 1).

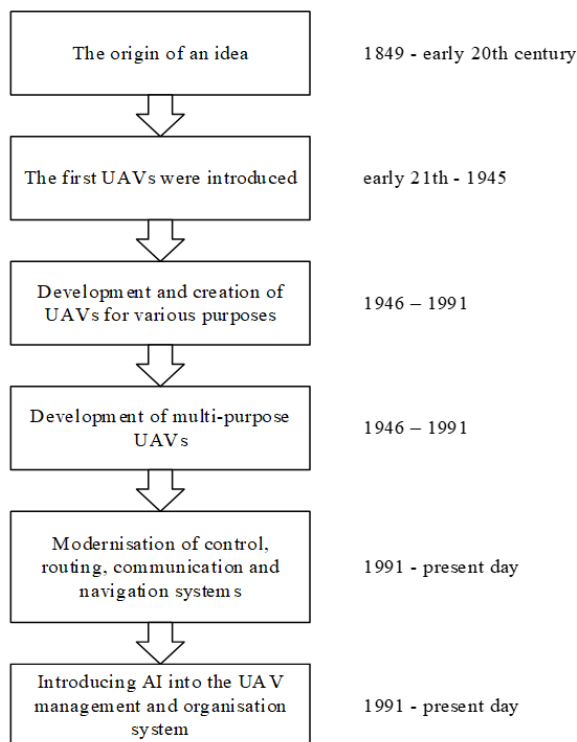


Fig. 1. Sequence of UAV development (developed on the basis of research [14])

After the security and defence forces started using single systems, the need to improve this area arose. In addition to upgrading the tactical and technical characteristics (TTC) of the UAVs, work was carried out to update the communication and routing control systems. More innovative technologies have been introduced

following the emergence of scientific opinions on the collective use of UAV systems and the integration of AI into management and decision-making systems.

The chronological development of UAV systems was studied in the research paper by V. Ryazanov. The author notes that the history of UAV development can be divided into four main stages. Among the trends of modern development, he lists the expansion of UAV strike capabilities and the creation of a high-capacity strike UAV; creation of a rear support UAV; miniaturisation and "intellectualisation" of UAVs; increased survivability; and equipment unification. The main trend is the gradual transfer of manned aviation functions to unmanned aircraft [14].

Modern science has already developed a method of self-organisation of UAV teams by defining roles and selecting the necessary robotic "performers", each of which has its own characteristics and features, its own special role and tasks (schematically shown in Fig. 2, Tabl. 2). Assigning a specific element of the UAV team system to the role of leader or subordinate performer has advantages, but also a number of disadvantages.

In addition, the process and main features related to the formation of an "internal" information exchange environment within a self-organising UAV group have also been studied by domestic researchers [15].

At the same time, despite active research in this area, a number of problems related to the development of methods and algorithms for group work still remain unresolved. The issue of integrating information technologies created on their basis and the specifics of their implementation in collective intelligence systems in order to increase the efficiency of solving poorly formalised tasks is not sufficiently studied. There is a tendency to integrate global navigation systems with each other and other systems, which requires expanding the width of the frequency spectrum that should be subject to electronic interference, and, in order to protect against the effects of EW, it is proposed to use additional, developed independent navigation systems and methods [16].

A common disadvantage of collective intelligence systems that use actors is that actors are selected empirically, and after a complex task is solved by a team of actors, it is impossible to estimate the probability of correctness or error of its solution. This hinders the development of collaborative work methods that can effectively solve complex drone routing problems posed by practice and create appropriate tools. Thus, in order to improve the performance indicator when using collective UAV systems in solving a number of difficult-to-formalise tasks related to routing, it is possible to introduce a system for creating a UAV team, each element of which is similar to the other and can play both the role of a leader and a subordinate. Through optimisation and customisation, UAVs will be able to perform more complex tasks in less time. The essence of this method is to coordinate all actors in a system, the last link of which is the operator.

This method will be controlled by only one UAV, which in turn will analyse the information received from other agents of the system and use AI. After that, it will make a rational decision and transmit the necessary information and tasks to all other elements of the system.

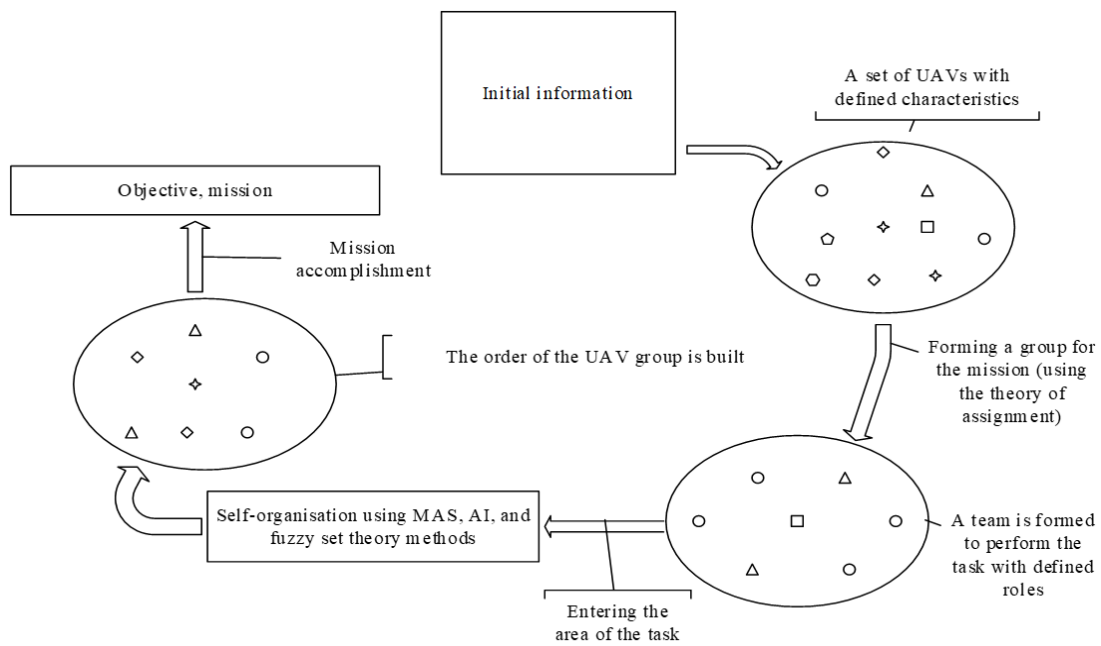


Fig. 2. Schematic representation of the existing UAV self-organisation method Source (developed by the authors)

Table 1 – Main characteristics of existing methods of building a UAV team

| Features of the existing method of UAV self-organization: | Theories and methods for construction are applied: |
|---|--|
| 1. Regarding control. With the advent of this method, the organisation of the UAV group management process has been simplified, and self-organisation has made it possible for one operator to manage a team of UAVs. | The theory of assignments; theory of fuzzy sets. |
| 2. Efficiency. The effectiveness of this method lies in the proportional reduction in the time required to organise and manage the team, which in turn increased the performance indicator. | A method of building multi-agent systems; is a method of applying artificial intelligence. |
| Advantages | Disadvantages |
| Simplifying the management of the UAV team. | Vulnerability of the built team due to a single leader. |
| Reducing the number of operators and control points. | The inability to continue the task due to the destruction or loss of communication with the leader or operator (control point). |
| Reduce the time required to complete a task. | When building this team, it still takes too much time to select the elements of the UAV group. |
| Increase in the performance indicator. | The economic inexpediency of using this method, due to the possible loss of all UAVs after destruction or loss of communication with the leader. |
| Reduced cognitive load on the operator. | The difficulty of transporting the group to the area of operations. |
| Rational use of resources (through AI). | Vulnerability of the method due to the influence of enemy electronic warfare (hereinafter - EW). |

The latter, in turn, firstly, have a clearly formalised task, and secondly, receive all the information accumulated and analysed by the leader. This, in turn, makes it possible for any agent to become the leader of the team in the event of the destruction or loss of communication with the agent who was in the role of leader at the time. An equally important fact is the bilateral nature of such information exchange, which is necessary to obtain the final situation not only for the operator but also for other members of the UAV team. Separately, it should be noted that all elements of the UAV team should not only self-organise into a system, but also have the ability to learn (the proposed method of organising the UAV team is shown in Fig. 3, Tabl. 2).

Thus, with each subsequent use of the team, each agent individually and the multi-agent system as a whole will have a certain knowledge base and algorithms for action when a certain task or difficult situation arises. When using the method of building a UAV team from identical elements, the problem that arises when the team

leader is destroyed and the system is subsequently destroyed disappears.

Conclusions

Results of work. The author analyses the main trends in the use of UAVs in the defence sector at the moment. The article highlights the key problems in this area, as well as the shortcomings of existing methods and systems, and a number of unresolved issues related to the development of methods and algorithms for group work. The scientific articles of domestic and foreign scientists are analysed, problematic issues are studied and ways of their solution are proposed. A method of self-organisation of the UAV team with decentralised control is proposed, in which a number of functions (route planning, distribution of roles, determination of optimal actions, obtaining and processing information) assigned to the onboard control system of the robotic air complex can be performed by each element of the UAV team system due to their self-organisation and self-exchange.

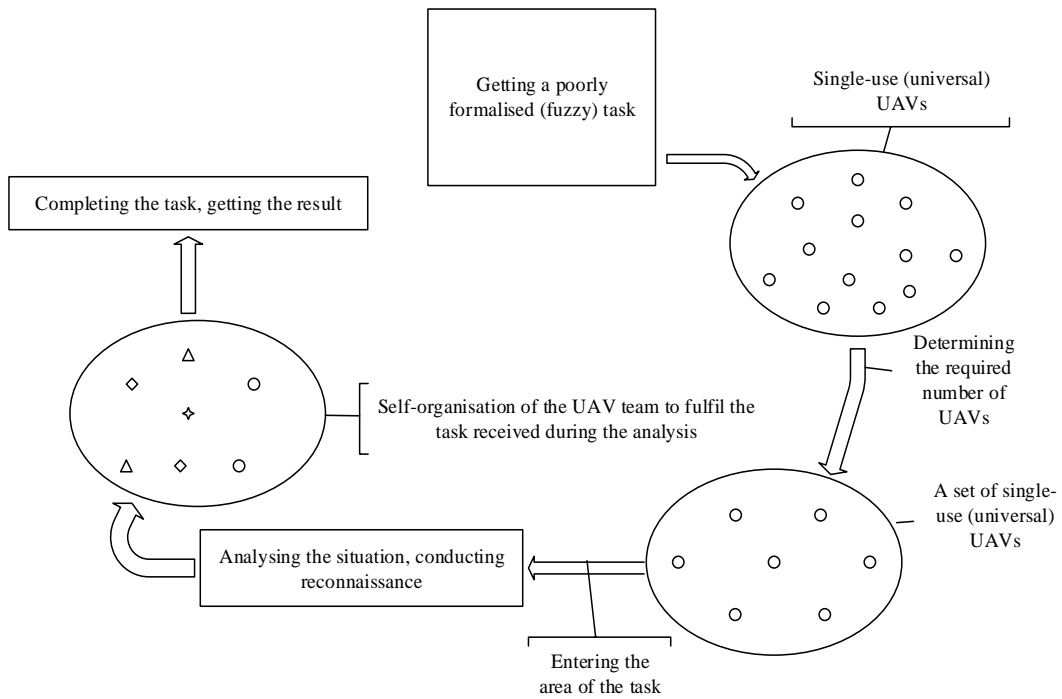


Fig. 3. Proposed model for building a UAV team Source (developed by the authors)

Table 2 – Main characteristics of the proposed method of building a UAV team

| Features of the existing method of UAV self-organization: | Theories and methods for construction are applied: |
|---|---|
| 1. Regarding the selection of team members. As each UAV is an identical element of the system, the time required to prepare and transport the group is reduced significantly. | Theory of fuzzy sets |
| 2. Regarding control. The development of this method will further simplify the organisation of the UAV group management process, due to their self-organisation and the ability to change their assigned roles, the operator performs an additional, supervisory function. | A method of building multi-agent systems; method of applying artificial intelligence; optimisation methods. |
| 3. Efficiency. The effectiveness of this method lies in the reduction of the time required to organise and manage the team, the unification and identity of the system elements, and, in addition, the team is more protected from complete destruction, which in turn will increase the performance indicator. | |
| Advantages | Disadvantages |
| Simplifying the management of the UAV team. | Vulnerability of the method due to the impact of enemy EW. |
| Reducing the number of operators and control points. | The complexity of creating and building algorithms for the interaction of system elements. |
| Reduce the time required to complete a task. | |
| Relative simplicity of transporting the team to the area of the task | |
| The security of the built team, due to the identity of its elements. | |
| The ability to continue the task after the leader or operator (control point) has been destroyed or lost. | |
| It doesn't take much time to build a team. | |
| Simplification of the UAV production process due to their identity. | |
| Increase in performance indicators, etc. | |

The implementation of the proposed method is possible if the AFU have universal, multi-purpose UAVs in service, the communication system of which is based on the proposed method. The following methods are missing to build the proposed system: 1) self-organisation of a team of homogeneous UAVs in solving poorly formalised tasks; 2) model of rules for collective intelligence of unmanned aerial vehicles when working as part of a group; 3) A method of self-organisation of unmanned aerial vehicles team for monitoring ground objects; 4) a method for coordinating decisions when monitoring ground objects by a team of unmanned aerial vehicles; 5) a method for routing flights of a team of

unmanned aerial vehicles when monitoring ground objects. The practicality of this method lies in the fact that the UAV's artificial intelligence will constantly self-learn and improve, and if necessary, can be reprogrammed to meet the required conditions of the task. As a result, the results and time required to complete missions will improve significantly, while the number of control operators will decrease. It solves a number of problems and shortcomings related to the organisation of the management system, route planning, distribution of roles, speed and completeness of receiving, processing and transmitting information, which in turn improves the security and performance of the system.

REFERENCES

1. Military Drone Market Size to Hit USD 23.78 Billion by 2027; Rapid Advancements in Drone Techn. to Open New Avenues of Expansion for the Market. URL: <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2020/11/11/2124835/0/en/Military.html>
2. Holeybo V. A. Orhanizatsiia roboty hrupy bezpilotnykh litalnykh aparativ / V. A. Holeybo, R. H. Melnikov // Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Kompiuterni systemy ta merezhi. Lviv. 2018. № 905. P. 56-63.
3. Berezhnyi A. O., Soroka M. Iu., Salo N. A. Metody rishennia zavdan planuvannia povedinky ahentiv v intelektualnykh systemakh pidtrymky pryiniattia rishen. Zbirnyk naukovykh prats, KhNUPS, Kharkiv. 2019. № 4(62). P. 18-24. DOI:10.30748/zhups.2019.62.02.
4. Berezhnyi A. O. Metody ta informatsiina tekhnolohiia avtomatyzovanoho planuvannia marshrutiv polotiv bezpilotnykh litalnykh aparativ dlia pidvyshchennia efektyvnosti poshuku ob'ektiv: Dysertatsiia. ChDTU, Kharkiv. 2020. 192 p.
5. Pohudina O. K. Metodolohiia formuvannia intelektualnoi skladovoi ahentnoi systemy roiu bezpilotnykh litalnykh aparativ : monohrafiia, NAU "Kharkivskiy aviatsiinyi instytut". Drukarnia Madryd. Kharkiv. 2021. 211 p. ISBN 978-617-7988-32-7.
6. Demidov B. O., Borysenko M. V., Kucherenko Yu. F., Zadorozhna A. Iu. Perspektyvni napriamky rozvytku i vykorystannia metodiv i tekhnolohii shuchnoho intelektu dlia ZSU v ramkakh vprovadzhennia suchasnykh innovatsii u viiskovii sferi. Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy. Kharkiv. 2021. № 3(44). P. 7-17. DOI:10.30748/nitps.2021.44.01.
7. Sarkar N. I. Artificial Intelligence-Based Autonomous UAV Networks: A Survey. Advances of Unmanned Aerial Vehicle Communication. New Zealand. Drones. 2023, 7. DOI:10.3390/drones7050322.
8. Mandloi Y. S., Inada Y. Machine Learning Approach for Drone Perception and Control. Tokai University. Pädiatrie. Tokyo. 2019. P. 424-431. DOI:10.1007/978-3-030-20257-6_36.
9. Kamate S., Yilmazer N. Application of Object Detection and Tracking Techniques for Unmanned Aerial Vehicles. Procedia Computer Science. USA. 2015. Vol. 61. P. 436-441. DOI:10.1016/j.procs.2015.09.183.
10. Bekhti M., Abdennebi M., Achir N., Boussetta K. Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles with Terrestrial Wireless Network Tracking. Wireless Days (WD), Toulouse. 2016. P. 1-6. DOI:10.1109/WD.2016.7461521.
11. Zain A. A., Zhangang H., Rana J. M. Collective Motion and Self-Organization of a Swarm of UAVs: A Cluster-Based Architecture. Time-Sensitive Networks for Unmanned Aircraft Systems. Sensors 3820. China. 2022. DOI:10.3390/s21113820.
12. Feifei Z., Yi Z., Bing H., Hongjian F., Zhuoya Z. Nature-inspired self-organizing collision avoidance for drone swarm based on reward-modulated spiking neural network. Patterns 3, 100611. China. 2022. DOI:10.1016/j.patter.2022.100611.
13. Kozhushko Ya. M., Hrychaniuk O. M., Samorok M. H., Balabukha O. S. Analiz mozhlyvoho bortovoho osnashchennia radiotekhnichnymy ta televizijnymy systemamy bezpilotnoho litalnoho aparatu. Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl. Kharkiv. 2018. № 4(58). P. 37-42. DOI:10.30748/zhups.2018.58.05.
14. Riazanov V. V. Zarodzhennia y rozvytok bezpilotnykh litalnykh aparativ u XX-XXI stolittiakh. Osnovni periody, tendentsii. Voienno-istorychnyi visnyk 4 (34). 2019. P. 172-190.
15. Shlokyn V. N., Malakhov S. V., Hostev A. L., Kozhushko Ya. N. Osobennosti postroeniia radyosety hruppi BPLA. Naukovyi zhurnal // Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. KhNU PS, Kharkiv. 2013. Vyp. 1 (33). P. 49-57.
16. Kozhushko Ya. M. ta inshi. Analiz ta osoblyvosti pobudovy barazhuichoho boieprypasu "lantset". Vyprovuvannia ta sertyfikatsiia. Cherkasy. 2023. (1(1), P. 61-69. DOI:10.37701/ts.01.2023.08.

Received (Надійшла) 24.01.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.04.2024

Моделі системи колективної самоорганізації безпілотних літальних апаратів з використанням штучного інтелекту

А. Тристан, Д. Жуков, А. Бережний

Анотація. У статті розглядається сучасний стан та тенденції розвитку безпілотних літальних апаратів (далі – БпЛА), методів та засобів управління ними, самоорганізації, маршрутизації польотів, а також залучення до системи колективу БпЛА технологій штучного інтелекту. Проаналізовано основні тенденції застосування БпЛА в оборонній сфері. Виділені ключові проблеми в даній області, а також нездолані вже існуючих методів та систем. Проведено аналіз наукових праць вітчизняних та закордонних науковців, вивчено проблемні питання та запропоновані шляхи їх вирішення. Впровадження в систему управління БпЛА штучного інтелекту має значимий потенціал і обумовлює актуальність розвитку цих технологій. Розвиток систем колективного управління БпЛА, у тому числі із використанням штучного інтелекту, дозволяє ефективно використовувати технології в різних областях, забезпечуючи підвищену координацію, функціональність та загальну ефективність. Разом з тим, незважаючи на активні дослідження в цій галузі, все ще залишаються не повністю вирішеними ряд проблем, пов'язаних із розробкою методів та алгоритмів групової роботи. Недостатньо опрацьовано питання інтеграції створених на їх основі інформаційних технологій та особливості їх реалізації в системах колективного інтелекту з метою підвищення ефективності вирішення складно формалізованих завдань. Запропоновано метод самоорганізації колективу БпЛА з децентралізованим управлінням, при якому ряд функцій (планування маршруту, розподіл ролей, визначення оптимальних дій, отримання та обробка інформації), покладених на бортову систему управління, роботизованого повітряного комплексу, можуть вирішуватися кожним елементом системи колективу БпЛА за рахунок їх самоорганізації. Практичність застосування зазначеного методу полягає у тому, що штучний інтелект БпЛА буде постійно самонавчатися й удосконалюватися, а при необхідності можна перепрограмувати під потрібні умови поставленого завдання. Таким чином, результати та час, необхідний на виконання місій покращиться у разі, а кількість операторів управління навпаки зменшиться. Вирішується ряд проблем та недоліків, пов'язаних з організацією системи управління, планування маршруту, розподіл ролей, швидкості та повноти отримання, обробки та передачі інформації, що в свою чергу покращує захист та продуктивність системи.

Ключові слова: авіаційний комплекс, агенти, алгоритми, безпілотний літальний апарат, інформаційні технології, колектив, координація, маршрутизація, мультиагентні системи, рій, розподіл ролей, самонавчання, самоорганізація, управління, штучний інтелект.

Алі Аль-Амморі, А. Є. Клочан, А. О. Дегтярєва, О. П. Шкурко, Х. А. Аль-Амморі

Національний транспортний університет, Київ, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ АНАЛІЗУ ПОЖЕЖ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

Анотація. Розглядається система сигналізації про пожежу як інформаційно-управляюча система, яка виконує функцію подачі світлового і звукового сигналу про виникнення пожежі в одному з відсіків повітряного судна. Дана класифікація і характеристика датчиків первинної інформації. При цьому для великого класу систем сигналізації повітряного судна різного покоління визначаються основні причини відмов датчиків, невиявлення і помилкових спрацювань, які на сьогоднішній день складають більше 70% з загальної кількості спрацювань систем сигналізації про пожежу. Побудована інформаційна модель аналізу пожеж силової установки повітряних суден і визначені основні параметри і сигналізатори (небезпечної температури газів, небезпечної температури підшипників, стружки в маслі, небезпечної вібрації і частоти обертання та інших параметрів), з метою переходу від монопараметричного до поліпараметричного контролю небезпечної пожежної ситуації на борту повітряного судна. Запропоновану інформаційну модель можна використовувати при підготовці пілотів для ліквідації небезпечних польотних ситуацій. Також, в роботі розглядається реальна катастрофа, яка пов'язана з пожежею двигуна, як приклад важливості своєчасного визначення першого моменту виникнення пожежі. При цьому приділяється більше уваги титановим пожежам і причинам їх виникнення.

Ключові слова: інформаційна модель, інформаційна безпека, інформаційні технології, датчик первинної інформації, достовірність інформації, пожежа двигуна, безпека польотів, інформаційно-управляючі системи.

Вступ

В даний час авіація є однією з найбільш результативних галузей сфери транспорту. Однак, відмови функціональних систем і збої авіоніки, а також відмови пов'язані з людським фактором можуть призвести до авіаційних пригод (АП) і авіакатастроф (АК). Ці негативні фактори знижують рівень безпеки польотів (БП) і ефективність експлуатації повітряного судна (ПС). Особливо велике зниження ефективності і БП спостерігається при пожежах ПС коли ситуація стає небезпечною і вимагає термінового втручання екіпажу ПС та прийняття правильних рішень для зупинки розвитку пожежі та її ліквідації. Безумовно, одним з найнебезпечніших видів пожежі на ПС є пожежа авіадвигунів (АД). Тому боротьба з пожежами АД і організація заходів з питань ліквідації пожеж шляхом наукових досліджень є актуальним завданням, яке вимагає спеціального підходу для його вирішення.

За даними міжнародної організації цивільної авіації (International Civil Aviation Organization) ICAO, розподіл АП за причиною виникнення має наступний вид – 20% з вини авіатехніки і 80% – людський чинник. Це стосується і аварійності при пожежах – 80% всіх катастроф так чи інакше пов'язані з діями екіпажу. Таким чином, пожежа – це небезпечна польотна ситуація, яка відноситься до класу проблемних ситуацій. Пожежа як явище для екіпажу є малоймовірним, несподіваним і швидкоплинним. Тому його ліквідація вимагає своєчасного втручання екіпажу. Ці труднощі виникають через невизначеність пожежі як за часом (першого моменту виникнення пожежі), так і за місцем виникнення, а також за видом пожежі (звичайна пожежа всередині двигуна чи титанова пожежа двигуна) [1, 2].

Аналіз світової статистики АП показує, що пожежі в повітрі [3], становлять близько 10% із загальної статистики АП. Відповідно до статистики Transportation Safety Board of Canada, частка пожеж складає 12% з загальної кількості АП за період з 2009 р. по 2019 р. Оскільки пожежі на ПС, як правило, носять фатальний характер, то така частка пожеж серед статистики АП є дуже високою. Для вирішення такої актуальної проблеми необхідно забезпечити екіпаж достовірною та своєчасною інформацією про стан функціональних систем (ФС) ПС, особливо інформаційно-управляючих систем (ІУС). Ефективність функціонування ІУС істотно залежить від достовірності інформації, що надходить на входи ІУС.

Відомо, що ефективність і якість управління технологічними процесами істотно залежить від достовірності інформації, що надходить на входи управляючих систем, від різного роду датчиків та систем вимірювання, які контролюють стан і хід виконання технологічного процесу. Збої можуть відбуватися як в апаратній частині датчиків, так і в програмному забезпеченні, або в структурі побудови ФС як це сталося з Boeing 737 MAX, польоти яких були припинені в березні 2019 року в зв'язку з тим, що менш ніж за рік розбилися два літаки цього типу. Перший - в Індонезії в жовтні 2018 року, другий - в Ефіопії в березні 2019 року. Загальна кількість осіб, що загинули в двох авіакатастрофах складає 346 осіб. Таким чином, рішення подібних проблем має світовий характер і потребує вирішення за допомогою математико-фізичних методів із залученням сучасних інформаційних технологій.

Реальні датчики характеризуються кінцевою точністю представлення контрольованого ними параметра. При цьому точність і достовірність інформації визначається як конструктивними особливос-

тами, так і технічною надійністю датчиків і, як правило, не задовольняють або слабо задовольняють нормам щодо точності і достовірності інформації, що подається на входи обчислювальних систем управління технологічними процесами.

Відомо, що вимоги нормативно-технічної документації (НТД) з експлуатації ПС і систем, при їх використанні за призначенням, допускають певні рівні виникнення особливої польотної ситуації (ОПС) на годину польоту [4–6]:

| | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| ускладнені умови польоту (УУП) | $P_{ууп} < 10^{-3} \quad 1/год$ |
| складна ситуація (СС) | $P_{сс} < 10^{-5} \quad 1/год$ |
| аварійна ситуація (АС) | $P_{ас} < 10^{-7} \quad 1/год$ |
| катастрофічна ситуація (КС) | $P_{кс} < 10^{-9} \quad 1/год$ |
| функціональна відмова | $P_{фв} < 10^{-7} \quad 1/год$ |

Пожежа як небезпечна польотна ситуація, завжди несе максимальне навантаження на екіпаж, а ймовірність небезпеки його появи класифікується як СС яка дуже швидко може переходити в АС і КС. Безумовно, якість системи сигналізації про пожежу (ССП) безпосередньо впливає на рівень безпеки польоту ПС, в тому числі на властивості системи "екіпаж-ПС".

Як правило, з огляду на порівняно невисокий рівень якості ССП і надзвичайно високу складність функції прийняття рішення екіпажем, пожежі двигунів поки що пов'язані з аварійними і катастрофічними ситуаціями. Це викликано тим, що існуючі системи ССП за своєю якістю мають цілий ряд недоліків:

- невисокий рівень надійності;
- висока ймовірність невиявлення і помилкових спрацьовувань;
- відсутність спеціальних пристроїв розпізнавання пожежі в перший момент її виникнення;
- утворення значних невизначеностей при прийнятті рішення екіпажем.

Постановка проблеми. За даними різних джерел [2, 3], кількість помилкових спрацьовувань сигналізації про пожежу перевищило кількість нормальних спрацьовувань в 3 рази. Таким чином, проблема боротьби з пожежами авіадвигунів і розробка способів підвищення ефективності їх розпізнавання є однією з актуальних проблем, яка вимагає різнобічного підходу до вирішення з використанням математичного моделювання та інформаційних технологій.

Відсутність багаторічного прогресу в її вирішенні, наявність тенденції зростання числа пожеж, показує необхідність створення принципово нового підходу до вирішення цієї проблеми, з новими логічними і теоретичними передумовами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час вирішено досить багато завдань по оптимізації надійності складних технічних систем: оптимізація елементної надійності, режимної, схемної і структурної надійності, оптимального резервування з залученням теорії і методів технічної кібернетики, експлуатації складних систем, системотехніки,

системного аналізу, процесного аналізу, теорії прийняття рішення, інформатики, прикладної математики та елементів інформаційних технологій. Дослідженню вище зазначеної проблеми присвячені роботи Глушкова В.М., Гнеденка Б.В., Ушакова І.О., Денисова В.Г., Комарова А.О., Анцеловича Л.Л., Буловського П.І, Зайденберга М.Г., Л.К., Волкова Л. І., Кривенцева В.І., Барлоу Р., Прошан Ф., Дмитриченко М.Ф., Соломенцева О.В., Кулика М.С., Корченка О.Г., Снитюка В.Є., Воробйова В.М., Левковця, Аль-Амморі Алі та інших [4, 5, 6, 7, 8, 9]. У той же час, лише невелика кількість робіт присвячена забезпеченню надійності, живучості, ефективності ГУС, які безпосередньо впливають на БП і ефективність експлуатації ПС. Таким чином, завдання залишається актуальним.

Метою статті є побудова інформаційної моделі аналізу пожеж силової установки ПС і визначення основних параметрів, що сигналізують про її появу, з метою переходу від монопараметричного до поліпараметричного контролю небезпечної пожежної ситуації на борту ПС.

Виклад основного матеріалу

Функціонування газотурбінного двигуна (ГТД) характеризується складною взаємодією різних його елементів і систем, оцінка стану яких проводиться шляхом контролю і вимірювання великої кількості параметрів.

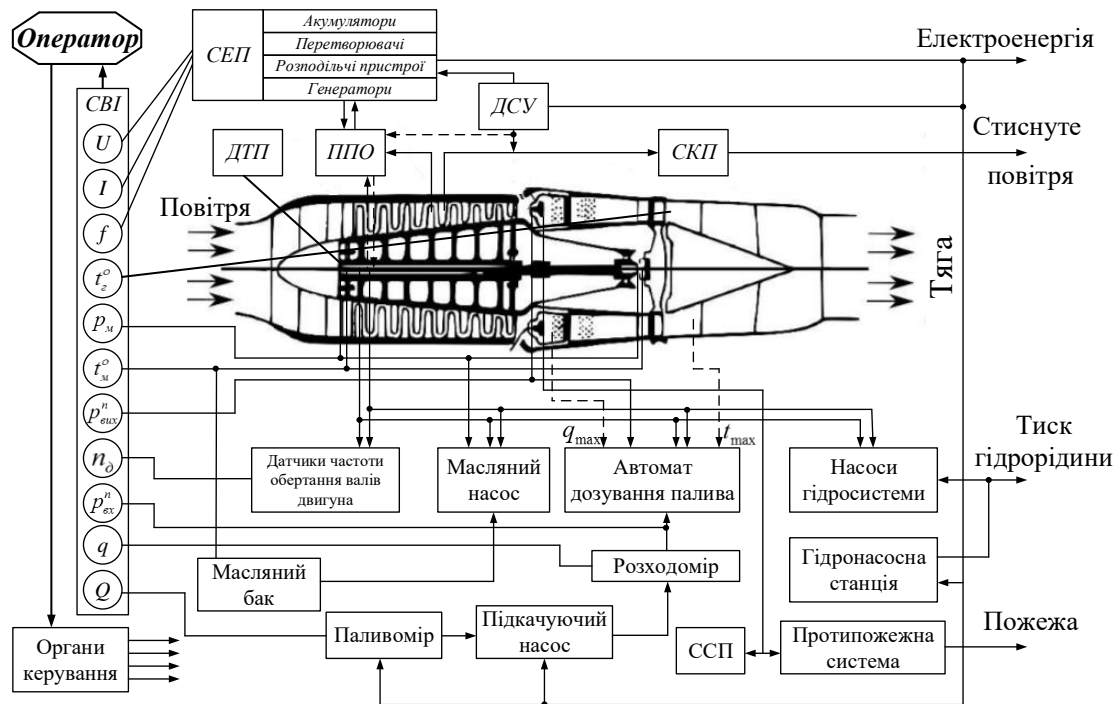
На літаках, які експлуатуються в даний час система контролю силових установок забезпечує отримання інформації з індикаторів і сигналізаторів для оцінки функціонування двигунів і систем силової установки в польоті, а також раннє виявлення несправностей основних вузлів двигуна і систем силової установки. Параметрична інформація, яку одержують з індикаторів, дозволяє екіпажу встановити задані режими роботи двигунів на всіх етапах польоту і контролювати якість їх функціонування при експлуатації літаків в різних умовах, як це показано на рис. 1.

Можна виділити наступні основні сигналізатори на основі інформації від яких відбувається оцінка стану двигуна і його основних вузлів за ознакою пожежі:

1) Сигналізатори небезпечної температури газів, що спрацьовують при порушенні газодинамічної стійкості двигуна і у випадках перевищення температури газів; основними причинами помилкових спрацьовувань є відмова конденсатора температури, перегорання трансформатора напруги ІБ, відмова підсилювача 2УЭ-6В ІБ.

2) Сигналізатори небезпечної температури підшипників, що дозволяють виявити руйнування підшипників оборотів турбокомпресора. Основною причиною помилкових спрацьовувань системи СТП-3 є завищення температури навколишнього середовища в районі установки підсилювача УС-3, що відбувається в результаті негерметичності системи відбору гарячого повітря від двигунів.

3) Сигналізатори стружки в маслі, що дозволяють виявити початок руйнування деталей двигуна.



СВІ – система відображення інформації, СЕП – система електропостачання, ДТП – датчик температури підшипників, ППО – привід постійних обертів, ДСУ – допоміжна силова установка, СКП – система кондиціонування повітря, ССП – система сигналізації про пожежу, U, I, f – напруга, сила струму та частота живлення системи електропостачання, t_g^o – температура вихідних газів, p_m – тиск масла, t_m^o – температура масла, p_{ex}^n – тиск палива на виході автомата дозування палива, p_{ex}^n – тиск палива на вході автомата дозування палива, n_o – частоти обертання валів двигуна, q – розхід палива, Q – залишок палива

Рис. 1. Інформаційна модель силової установки ПС

Основними причинами помилкового спрацьовування є попадання волосоподібних металевих частинок, що замикають електроланцюг сигналізації, струмопровідного графіту між пластинками, волога в штепсельних роз'ємах (ШР).

4) Сигналізатори небезпечної вібрації, що дозволяють виявити несправності, пов'язані з механічними uszkodженнями. Основними причинами помилкових сигналів про небезпечну вібрацію є відмови вібродатчиків (заїдання рухомої системи, знос підшипників, осей і обрив обмотки) електронного блоку, потрапляння вологи в штепсельні роз'єми електронного блоку.

5) Сигналізатори пожежі призначені для автоматичної сигналізації про пожежу в будь-якій з гондол і у відсіку ДСУ [10, 11, 12, 13]. Основними причинами помилкових спрацьовувань є: зміна чутливості каналу виконавчого блоку; замикання в ШР комутаційної системи через попадання вологи; електричні наведення в ланцюзі датчиків переважають допустимі значення через порушення в трасуванні електропроводки.

З вище наведеного можна зробити наступні висновки:

1. Недостатній рівень надійності систем сигналізації призводить до помилкового спрацьовування сигналізаторів.

2. Обмежені можливості вбудованих систем контролю справності вимірювальної апаратури і відсутність автоматизованої видачі інформації про відмову систем вимірювання призводять до помилок

типу помилкової тривоги при яких екіпаж вимикає справно працюючий двигун.

Кількість передумов АП ПС і АД, коли екіпаж сприймаючи помилкову інформацію за відмову двигуна, вимикає його, становить 70% від їх загальної кількості.

Важливе значення у своєчасному розпізнаванні відмов і несправностей силових установок мають системи бортової сигналізації. Для контролю за станом силових установок застосовують такі системи сигналізації: пожежа в двигуні або мотогонодолі, небезпечна температура газів, небезпечна температура підшипників, небезпечна вібрація, стружка в маслі, мінімальний тиск масла і палива, мінімальний залишок масла, надлишок масла, засмічення паливного фільтра, положення механізації компресора, положення замка і створів реверсу, обмерзання двигуна та ін.

Системи індикаторів, за якими оцінюється робота двигунів, відхиляються на неоднакові кути, що ускладнює розпізнавання стану відмови двигуна, особливо в умовах дефіциту часу.

Більшість світлосигнальних індикаторів при спрацьовуванні не висвічують номер двигуна, що відмовив або несправного двигуна, в зв'язку з чим в умовах обмеженого часу не виключається можливість помилкового віднесення сигналу відмови до справного двигуна. Невизначеність істинного стану авіадвигуна при наявності ознак відмов або несправностей багато в чому обумовлена імовірнісною природою великої кількості різноманітних технічних

причин відмов двигуна і його систем, а також можливістю появи помилкової інформації систем контролю в процесі розпізнавання відмови і прийняття рішення. Ліміт часу на розпізнавання і прийняття рішення, небезпека наслідків раптової відмови двигуна накладають певні обмеження на наявний час виявлення, розпізнавання і локалізація відмови. Відмова двигуна небезпечний своїми наслідками, перш за все, втратою тяги, що особливо небезпечно при зльоті, можливими вторинними руйнуваннями конструкції двигуна, планера або їх систем і це все може супроводжуватись "пожежею", що може створити катастрофічну ситуацію. До небезпечних режимів роботи АД відносяться наступні фактори, які визначають причини пожеж АД ПС, як показано в табл. 1.

Таблиця 1 – Фактори, які визначають причини пожеж АД ПС

| Небезпечні режими АД | Ознака пожежі | Не викликають пожежу |
|---|---------------|----------------------|
| Мало масла | | - |
| Стружка в маслі | + | |
| Надлишок масла | + | |
| Падіння тиску масла. Р масла | + | |
| Падіння тиску палива. Р палива | + | |
| Фільтр засмічений | + | |
| Небезпечна t газів | + | |
| Зупинка показчика t газів | + | |
| Небезпечна t підшипників | + | |
| Вібрація велика | + | |
| Клапани перепуску | | - |
| РНА прикритий | | - |
| Замок реверсу. Мимовільне відкриття | | - |
| Стулки реверсу: режим зворотної тяги | | - |
| Пожежа | + | |
| Помпаж | | - |

Результати експертної оцінки опитувань пілотів і бортінженерів цивільної авіації, які мають великий досвід рейсів і льотно-випробувальної роботи на літаках з ГТД дозволяє виявити ступінь небезпеки можливих результатів від прийнятих рішень з локалізації відмов двигунів у польоті, які приведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Ступінь небезпеки відмов двигунів

| Можливі результати польоту | Ступінь небезпеки |
|--|-------------------|
| Невимикання двигуна при істинному сигналі: | |
| Пожежа в мотогондолі | 10.0 |
| Небезпечна t газів (ознака помпажа) | 8.5 |
| Небезпечна вібрація | 8.2 |
| Перегрів опор двигуна | 4.7 |
| Стружка в маслі | 4.3 |
| Падіння тиску масла | 4.3 |

Як видно з табл. 2, найбільшу небезпеку при виникненні пожежі в мотогондолі створює ситуація невимикання двигуна при істинному сигналі про відмову. Тому КЛЕ передбачає екстрене вимикання двигуна навіть на етапі тривалого зльоту в разі заго-

рання табло "пожежа" і спрацюванні при цьому першої черги протипожежної системи.

У зв'язку з небезпекою пожежі і наявності безлічі параметрів, за якими можна визначити стан роботи двигуна з однозначним отриманням достовірної інформації необхідно переходити на принципово новий математичний метод розпізнавання проблемних ситуацій, які пов'язані з небезпечними режимами роботи авіадвигуна.

Цим методом може бути інформаційно-факторний аналіз на основі мультиплікативних функцій взаємодія факторів [7]:

$$S_i = -\prod_{i=1}^n (p_i)_i \log \prod_{i=1}^n (p_i)_i \quad (1)$$

де p_i – імовірність появи діючого чинника в системі «екіпаж-ССП».

На основі математичної моделі, отримані графічні залежності які показують, що при збільшенні інформаційного навантаження в системі «екіпаж-ССП» невизначеність функції прийняття рішення стає гранично невизначеною, і при дії одночасно 4 факторів екіпаж виходить поза межні можливостей і не може впоратись з факторною накладкою.

Пожежа як складна проблемна ситуація вимагає поліпараметричного контроль параметрів функціонування системи "екіпаж-ССП" при пожежі на ПС для забезпечення безпеки польотів (БП).

Підвищення БП здійснюється шляхом цілеспрямованого впливу на фактори, що впливають на БП. Основним джерелом інформації для оцінки небезпечних факторів є розслідування авіаційних подій (АП та інцидентів).

Прикладом цього може служити АК літака Ту-154, де загинуло 104 пасажери і сім членів екіпажу. Політ тривав 8 хвилин 42 с. при аналізі звукового запису і розшифровці польотної інформації отримано графік параметрів польоту і роботи силових установок рис. 2. З графіків можна побачити, як розвивалися особливі польотні ситуації цієї катастрофи (табл. 3).

Таблиця 3 – Аналіз причин розвитку ОПС

| ОПС | Причина ОПС і її розвитку |
|-----|--|
| УУП | Було чути удар |
| СС | Спрацювала сигналізація " пожежа в 3-му двигуні". Пожежа-в результаті руйнування трубопроводу і неможливості закриття паливного крану (постійне надходження палива в 3-й двигун) |
| АС | Всі черги протипожежної системи були застосовані, але пожежа залишилася |
| КС | Відмова системи управління літаком |

При розслідуванні авіакатастрофи необхідно аналізувати весь комплекс причин, який сприяв цій катастрофи, як це показано на рис. 3. Показані системні заходи які необхідно виконувати в подібних ситуаціях з урахуванням факторів, які впливають на поліергатичну систему "екіпаж-ПС", включаючи, як, виробничі так, і експлуатаційні фактори, де оператор є головною ланкою цієї системи в процесі прийняття рішення і запобігання граничних ситуацій.

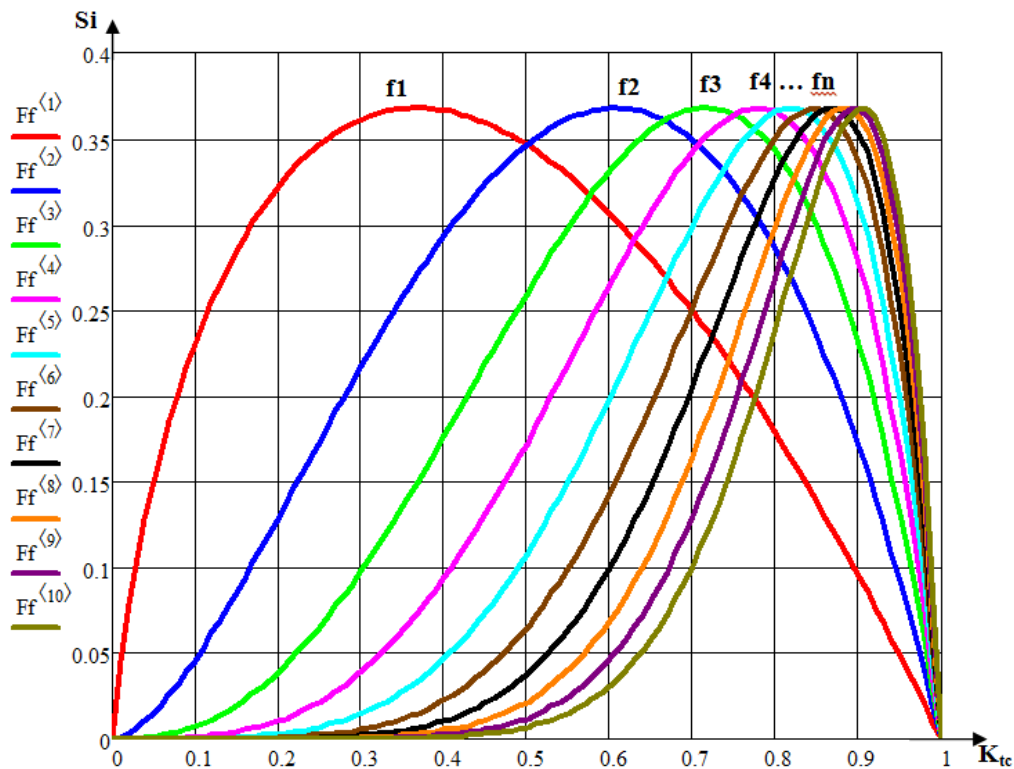


Рис. 2. Графічні залежності інформаційного навантаження системи "екіпаж-ССП" від кількості взаємодіючих факторів

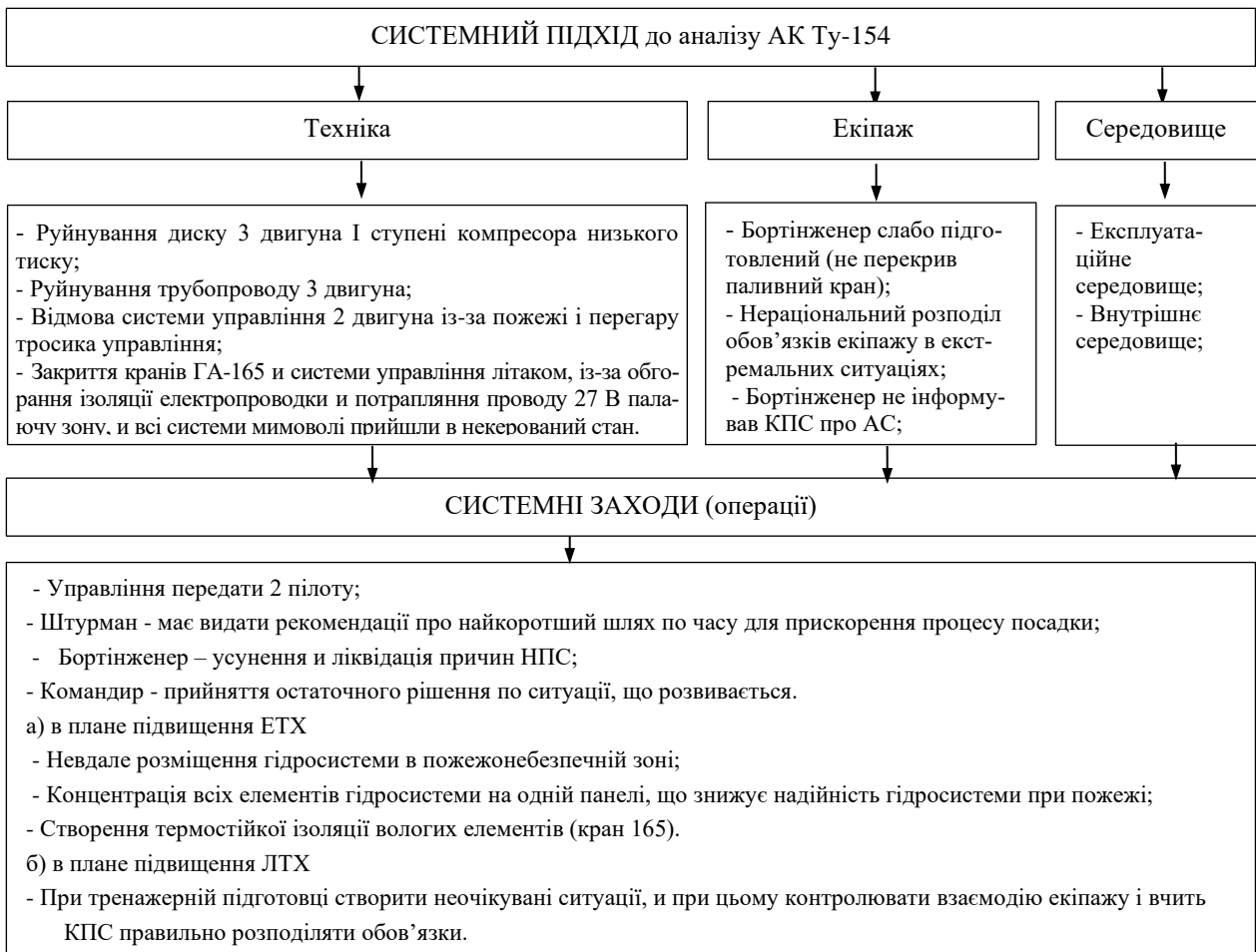


Рис. 3. Аналіз процесів розвитку НПС АК Ту-154

При проблемному аналізі авіакатастроф, пов'язаних з пожежею двигунів, за методикою інформаційно-факторного аналізу (ІФА) дуже важливо розуміти, що вся проблемна ситуація, яка потім переходить в катастрофічну, повинна з позиції ІФА розглядатися як ситуація, яка складається з декількох етапів. Умовно приймаємо, що в початковий момент ситуації всі 3 двигуна створюють ΔS_{max} - зону мак-

симальної невизначеності, тому що поява пожежі - вкрай мало ймовірна і абсолютно несподівана подія для екіпажу.

При виключенні двигуна ця невизначеність зникає, тому ми позначимо процес вимкнення двигуна через символ (-): як зняття ΔS .

У табл. 4 наведено аналіз наслідків катастрофи шляхом аналізу появи та зняття ΔS .

Таблиця 4 – Перехід від ΔS_{max} до ΔS_{min}

| Час | ΔS_{max1} | ΔS_{max2} | ΔS_{max3} | Вихідні стани |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| 3.21 | | + | | |
| 3.26 | | - | | |
| 3.31 | | | + | |
| 3.34 | | + | | |
| 3.43 | + | + | + | Горять всі двигуни |
| 3.55 | | | + | |
| 3.59 | - | | | |
| 4.02 | | | + | |
| 4.03 | | - | - | |
| 4.12 | + | + | + | Не запускається жоден |
| 4.32. | | | | Запусти хоч один |
| 4.41 | | - | + | |
| 4.56 | | - | + | |
| 5.09 | - | | | |
| 5.17 | | - | + | |
| 5.18 | - | - | | |
| 5.24 | + | + | + | Пожежа горить |
| 6.15 | + | + | + | |
| 6.45 | + | + | + | |
| 7.07 | - | | + | |
| 7.09 | | + | | Другий горить |

Видно, що фактично при монопараметричному контролі за роботою двигунів, як було при цій авіакатастрофі 3-й двигун (який горів) був поза контролем екіпажу (число ΔS_{max} - 11, закреслений (знятий)- 1), тобто весь час в максимальній зоні невизначеності. Цю зону максимальної невизначеності можна зняти тільки переходом до поліпараметричного аналізу.

З таблиці видно, що невизначеність ситуації не зменшувалася з третім двигуном, а зростала. Можна виділити 3 критичних моменти, коли ситуація була гранично максимально невизначеною.

Таким чином, якби в проблемній ситуації з самого початку був забезпечений перехід від (3 ΔS_{max} до ΔS_{min}) - трьох максимумів до мінімуму невизначеності в початковий момент проблемної ситуації за допомогою поліпараметричного розпізнавання ознак пожежі (контролю), то ситуація могла б розвиватися по іншому, оскільки двигуни 1 і 2 могли працювати по іншому.

Тому створення поліпараметричних систем розпізнавання пожеж дає велику можливість в перші моменти зняти максимальну невизначеність ситуації,

а в подальшому не дати їй досягти знову максимуму, як це було 3 рази (3.43; 4.12; 5.24) в Краснояській катастрофі.

З аналізу табл. 5 можна зробити наступні висновки:

1) третій двигун, який горів, був без контролю і весь час в ΔS_{max} .

2) відсутність поліпараметричного контролю в початковий момент проблемної ситуації - головна діюча причина, яка призвела до катастрофи.

3) це не просто помилкові дії БІ, а вказівка в технологіях на перехід контролю за поліпараметричним принципом в початковий момент катастрофи.

Таблиця 5 – Кількість S_{max} и S_{max} зніманий

| | S_{max} | S_{max} зніманий |
|----|-----------|--------------------|
| Д1 | 6 | 4 |
| Д2 | 7 | 6 |
| Д3 | 11 | 1 |

При аналізі таблиць 4 та 5 видно, що через відсутність контролю параметрів третього двигуна в

проблемній ситуації у екіпажу було три критичні моменти, коли ситуація оцінювалася по третьому ΔS , тобто як гранична ("Горить", "Не запускається ніякий", "Пожежа. Горить").

Висновки

У міру розвитку проблемної ситуації відбувалося зростання невизначеності ситуації-червона лінія.

Зняти це зростання невизначеності можна було тільки переходом від операції "вимкнути Двигун" до технологій поліпараметричного контролю всіх двигунів.

Таким чином, можна зробити наступні висновки.

1. Пожежі двигуна являють собою не просто випадкові ситуації, а характеризуються як складні або поліфакторні явища і процеси, які несуть знач-

ний ступінь ризику і граничну невизначеність для процесу польоту ПС.

2. Невизначеність початкового моменту виникнення будь-якої пожежі двигуна призводить до того, що функція прийняття рішення КПС і екіпажем стає технологічно і операційно гранично складною, тому навіть прості операції і сенсомоторні рухи під час раптового і несподіваного виникнення пожежі виконувати екіпажу досить важко.

3. Всі системи сигналізації про пожежу є складними логіко-динамічними системами, тому необхідно обґрунтувати оптимальні варіанти їх структур і забезпечити їх ергономічну досконалість.

4. Інформаційно-факторна модель створює перспективи більш глибокого аналізу проблемної ситуації при пожежах і дає підставу для переходу від монопараметричного до поліпараметричного контролю параметрів роботи двигуна при пожежі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Transportation Safety Board of Canada. Statistical Summary. Air Occurrences in 2018. - Режим доступу: URL: <https://bst-tsb.gc.ca/eng/stats/aviation/2018/ssea-ssao-2018.pdf>
2. Aviation Safety Performance Reports and Statistics. - Режим доступу: https://www.skybrary.aero/index.php/Aviation_Safety_Performance_Reports_and_Statistics.
3. ICAO. Safety Report. 2020 Edition. - Режим доступу: URL: https://www.icao.int/safety/Documents/ICAO_SR_2020_final_web.pdf
4. Основи теорії надійності, експлуатації та ремонту радіоелектронної апаратури / О.В. Соломенцев, Ю.М. Хмелько, І.К. Жаров та ін.; Нац. авіац. ун-т. – К., 2007. – 108 с.
5. Barlow R.E., Proschan F. Mathematical Theory of Reliability. SIAM, 1987. - 274 p.
6. Надійність та експлуатація систем та комплексів авіаційного обладнання. Терміни та визначення. ДСТУ 3589-97. – К. : Держстандарт, 1997.
7. Аль-Аммори Х.А. Аналіз операторської діяльності при локалізації титанової пожежі на повітряному судні / Х.А. Аль-Аммори, // Slovak international scientific journal – Bratislava, 2018. – № 17 Vol. 1. – С. 50 – 54.
8. Al-Ammouri, A. Development of a mathematical model of information serial redundancy of management information systems of the aircraft fire alarm [Текст] / А. Al-Ammouri, Р. Dyachenko, А. Degtiarova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 2, Issue 9 (86). – P. 4–10. doi: 10.15587/1729-4061.2017.96296.
9. Al-Ammouri Ali. Estimation the Information Reservation Effectiveness of Unmanned Aerial Vehicle Information-Control System / Ali Al-Ammouri, A.O. Degtiarova, H.A. Al-Ammori, A.E. Klochan, O.P. Tymchenko // Electronics and control systems. – 2017. – № 4(54). – P. 18–26.
10. AIRCRAFT Maintenance Manual 737-300/400/500. - Seattle, Washington, USA: Boeing commercial Airplanes group, 1999 – 5417 p.
11. Aeroengine Safety: Damages from Metal Fires. - Режим доступу: <https://aeroenginesafety.tugraz.at/doku.php?id=9:91:912:912#prettyPhoto>.
12. Engine Fire Detection Systems and Fire Zones - Aircraft Engine Fire Protection Systems. - Режим доступу: <https://www.aircraftsystemstech.com/p/engine-fire-detection-systems.html>.
13. Titanium Fire in jet engines. - Режим доступу: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/fsr-0457.pdf>

Received (Надійшла) 27.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.04.2024

Information model of aircraft power plant fire analysis

Ali Al-Ammori, A.Ye. Klochan, A.O. Degtyareva, O.P. Shkurko, H.A. Al-Ammori

Abstract. The fire alarm system is considered as an information and control system that performs the function of providing a light and sound signal about the occurrence of a fire in one of the compartments of the aircraft. The classification and characteristics of primary information sensors are given. At the same time, the main causes of sensor failures, non-detection and false alarm for a large class of aircraft alarm systems of various generations, which today account for more than 70% of the total number of fire alarm system activations are determined. An information model for the analysis of aircraft power plant fires was built and the main parameters and indicators were determined (dangerous gas temperature, dangerous temperature of bearings, chips in oil, dangerous vibration and rotation frequency, and other parameters), with the aim of transitioning from monoparametric to multiparametric control of a dangerous fire situation on board of the aircraft. The proposed information model can be used in the training of pilots to eliminate dangerous flight situations. Also, the paper examines a real disaster related to an engine fire as an example of the importance of timely determination of the first moment of fire occurrence. At the same time, more attention is paid to titanium fires and their causes.

Keywords: information model, information security, information technology, primary information sensor, reliability of information, engine fire, flight safety, information and control systems.

R. Baranenko¹, A. Mostova², N. Sas³, O. Kurbanova⁴

¹ Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine

² Varna University of Management, Varna, Bulgaria

³ Instituto Federal do Parana, Parana, Brazil

⁴ Interregional Academy of Personnel Management, Kyiv, Ukraine

CRM TOOLS TO ENSURE THE PROTECTION OF INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Abstract. The article examines the main aspects of using CRM systems in the management of relationships in companies under the condition of ensuring intellectual property rights. It was determined that the protection of intellectual property rights is considered through the prism of the development and implementation of a system of legal norms that require regulation of relations aimed at the need to create and implement intellectual property objects. The need to protect intellectual property rights, which is mediated by the design, development and use of special software, has been proven. Based on the analysis of the essence of the concept of intellectual property and the definition of its main components, the introduction of specially developed software is proposed. The choice of the software environment and tools for the implementation of the visual design of the proposed database is substantiated, which unites all stages of its development and implementation in a single seamless environment for the purpose of ergonomics and optimization of writing code in the appropriate scripting environment, which aims to ensure the generation and reproduction of tables, comparison of databases, synchronization of schemes and data, preparation of reports and optimization of the methodology and technology of their distribution, as well as fast and effective security management in databases. The main areas of implementation of the CRM management strategy and the implementation of software developments in the organization of the company's work, as well as the components of the information support of CRM systems, are presented. The method of implementing the CRM strategy in the company's activities is proposed. An information system for accounting of the company's activities was designed and developed on the basis of the CRM system. The main features, advantages and disadvantages of using CRM systems in the company's activities are determined. The scientific and practical utility of the proposed information management system allows for a step-by-step and component analysis of all business processes, to make management decisions for the purpose of better cooperation and legal protection of intellectual property in the modern information space.

Keywords: CRM, information system, information technologies, design, intellectual property.

Introduction

Thanks to the rapid increase in the capabilities of informatics and new information technologies, the information environment of people's living and life activities is being formed, and an information society is being created. The modern century is characterized by the intensive development and implementation of informatics in all spheres of society. This was manifested in the intensive improvement of computer and communication equipment, in the emergence of new and further improvement of existing information technologies, as well as in the implementation of applied information systems. The achievements of informatics have taken an important place in organizational management, in industry, in conducting scientific research and automated design. Informatization also covered the social sphere: education, science, culture, medicine. Information technologies are gradually, actively and relentlessly integrated into all spheres of human activity and society, becoming a powerful catalyst and a determining source of their objective development. Informatization is an important factor in changing the quality of life in society: because in modern conditions, the level and way of life begins to increasingly depend on the level and quality of services, culture, education, work organization, etc.

The process and content of the informatization of society boils down to the spread of media culture in one

or another society, which, in turn, unites society with permanent ties. In the political plane, the transition of society to the informational stage of development provides an opportunity to use democratic institutions as an instrument of social control. Informatization in the field of economy leads to the emergence of new branches of production, changes the very idea of the real sector of the economy, which includes virtual reality in telecommunications networks, and in particular on the Internet. The possibilities and scale of capital movement are growing sharply, financial transactions are carried out with extraordinary speed and ease. Informatization affects all spheres of human life: it contributes to the growth of labor productivity, improvement of economic management, development of knowledge-intensive industries and high technologies, enrichment of spiritual life and further democratization of society, etc. Information technologies open a new page in the development of science and the life of society as a whole.

Analysis of recent research and publications. A number of domestic and foreign researchers constantly pay attention to the problem of designing and developing CRM systems. Modern developers and specialists in the field of IT study the experience of other specialists in the design of information systems. D. Korpuseenko investigates CRM methodology and examines the need for their implementation for various types of service provision, in particular examines KeepinCRM, PipeDrive, KeyCRM, asserting the

leading role of those that have mobile as a powerful component [1]. The main functions of the CRM system and classification of CRM systems, batch and individual, analysis of their advantages and disadvantages are considered G. Chubenko, M. Loshytskyi, D. Pavlov, S. Bychkova, O. Yunin [2]. K. Popova studies the problems of implementing CRM systems and analyzes their differences depending on where the information is stored and how the system is protected [3]. A. Hafiyak investigates CRM systems as a component of modern intelligent management technologies [4]. L. Dolgova and H. Yamnenko analyze the importance of using information technologies in the automation of business processes of the enterprise and prove the importance of using software in the field of relations with partners [5–7].

Main part

For the world economy, as well as for developing countries and countries with a transitional economy, including Ukraine, this phenomenon poses certain dangers. First, the countries where the least secured layers of the goal do not have access to information and knowledge to achieve better welfare, have less dynamic development. Secondly, due to the fact that the evidence and methods of increasing the efficiency of production due to the use of ICT are practically unknown in this country, the opportunities for it are not used and are not multiplied there development. In today's world, the level of employment is affected by factors generated by the processes of globalization and regionalization of the world economy, the progress of information technology and methods management and communication

technologies, new management methods and business strategies. The approach to content, content and methods of obtaining knowledge and obtaining information is changing. Labor markets are influenced by technological advances in the areas of computerization, biotechnology, energy, communications, and space research. Another phenomenon of the informatization of modern state life has become the information war, as a result of new reasons for information gathering. The essence of this revolution is not so much in increasing the technical characteristics of weapons and the emergence of new technological solutions as in a new conceptual understanding of the goals and tasks of defense politicians.

Simultaneously with the development and improvement of the legislative framework, Ukraine should stimulate the development of innovative and the creation of new specialized network structures and technologies built on the basis of international standards, as well as organize the development lack of broad social and political support for the process of the country's transition to the information society. This will speed up qualitative changes, ensure high efficiency and speed up the process of informatization in Ukraine, which will accordingly reflect on the quality of the social and political life of the state [1]. The main task of protecting intellectual property rights is to establish a number of legal norms that indicate the processes of support and definition of relations with respect to intellectual property objects. The need for permanent protection of intellectual property rights is determined by the main components presented in Fig. 1.

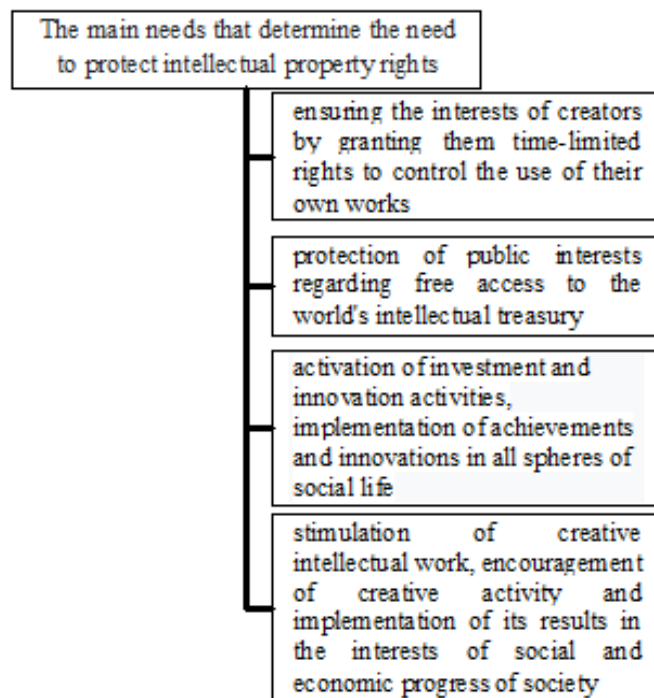


Fig. 1. Basic needs for the protection of intellectual property rights

The authors chose the MySQL Workbench software environment to perform the task, namely the

design and creation of an information system, the core of which is a database. MySQL Workbench is a

specially designed software tool for visual design, it contains a number of capabilities designed to implement all stages of working with the core of the information system, which includes modeling, development and its implementation in a single seamless environment for MySQL, which is the next step, and namely DBDesigner 4 from FabForce. Among the defining characteristics of MySQL Workbench, it is possible to note the increased speed of writing SQL code in a convenient scripting environment; generation and reproduction of tables; comparison of characteristics, structures and content of databases, synchronization of schemes and data; preparation of reports and automation of their distribution; fast and efficient management of the processes of protection of filling and structure of databases.

The database contains tables specific to the field of legal protection of intellectual property, with columns of certain types of data, namely: "CopyRightOwner" – copyright owner; "Own" - a work that is an object of intellectual property; "License" - work license; "InfringementAct" – an act of offense; "InfringingOwn" - work that violates intellectual property rights; "Infringer" – violator; "CourtVerdict" – court decision; "Liability" – responsibility.

For each database that is planned for permanent use, a series of tests should be conducted, which was performed by the authors of this study. Performance testing of the developed software product is aimed at overcoming potential difficulties in the decision-making process. A CRM was developed for the department of analysis and provision of the intellectual property protection system. CRM "ZOHO" was used for this (Fig. 2).



Fig. 2. CRM "ZOHO"

After completing the registration process, system settings are performed and data is entered in this section with contacts (Fig. 3).

This is worth noting that the functionality of the portal is configured correctly sometimes.

The CRM system helps to automate work and establish employee communication, other specialists, clients. For this, you should use ready-made modules of the CRM system. Note that in context improving the quality of work, you can conduct online testing with further storage results in the knowledge base in the wiki directory. Effective communication between by management subjects, using a single messenger, closed chats, open channels in order to improve the automation of business processes.

Data is entered in the service provision section in the same way as it was done with contacts (Fig. 4).

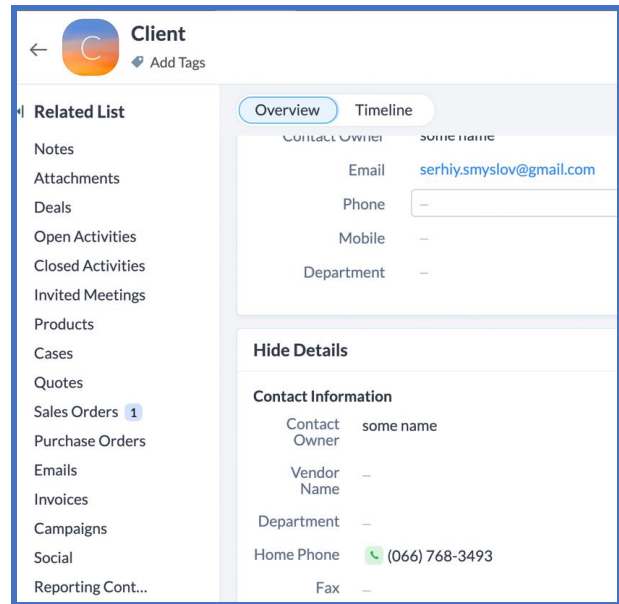


Fig. 3 Information about one of the contacts

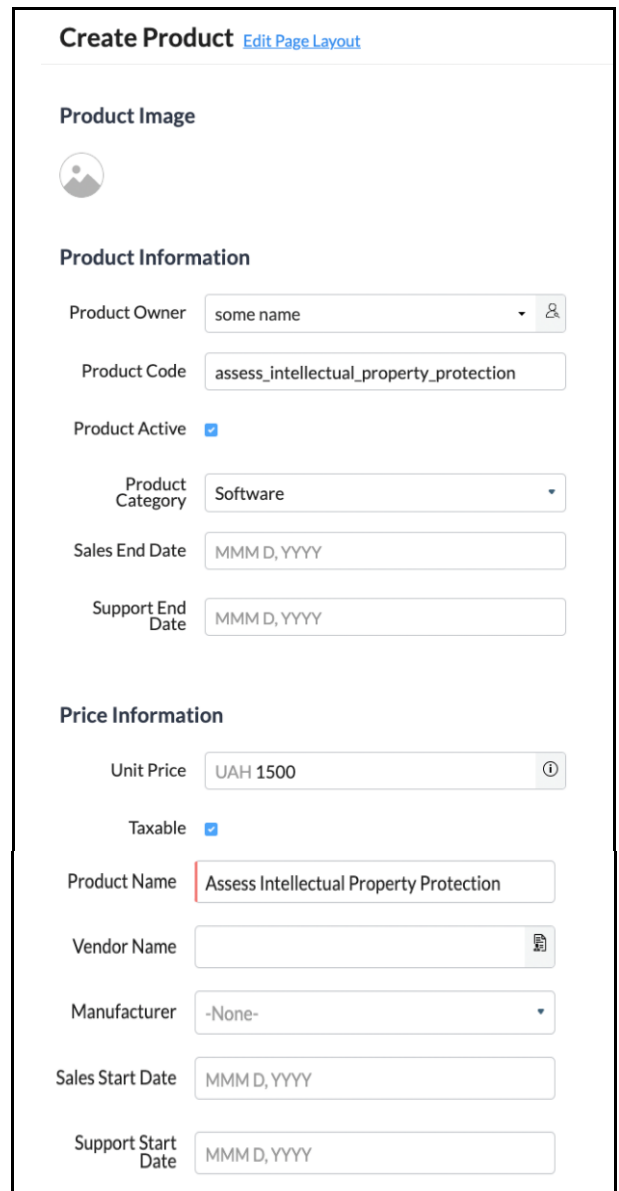


Fig. 4. Creating a service

Conclusions

Informatization of society is a process concept, that is, it has stages of implementation.

At the first stage, the anticipatory development of scientific and technical directions is envisaged, which directly ensure the creation and use of new information technologies.

The second stage is characterized by computer development of the information fund, uploading it to databases, which have been integrated into local computer networks. But free access to information stored in such databases has a limited range of users, and the process of forming the information culture of the population is still ongoing.

The third stage of informatization involves ensuring free access to all information accumulated by mankind, the opportunity not only to use, but also to replenish the regional, national and global information

fund. The information fund becomes the property of almost every resident of the country, so this stage can be called the stage of socialization and updating of the country's information fund.

In the course of the research, an information system was developed that allows you to conveniently store data on a fairly wide range of aspects of this field, and a CRM for legal protection of intellectual property.

When solving the task, the following actions were performed:

created database table structures, indexes and table expressions;

tables were filled with information;

linked tables using foreign keys (one-to-one, one-to-many and many-to-many);

developed the necessary requests to solve the tasks that were set in the condition;

CRM is configured and all necessary objects for the system are created.

REFERENCES

1. Korpusenko D. The best CRM systems URL: https://dta-ua.site/krashchi-crm-sistemi?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIoYLXx_PchAMVjICDBx15HgHaEAMYASAAEgLI7_D_BwE
2. Chubenko G., Loshytskyi M., Pavlov D., Bychkova S., Yunin O. Study of the client's financial activities; Business relations. Terminological dictionary on preventing and countering the legalization (laundering) of criminal proceeds. Kyiv, 2018. 219.
3. Popova K. What is a CRM system: a complete guide to choosing a CRM for beginners URL: <https://nethunt.ua/blog/shcho-takie-crm-sistemi-povnij-ghid-po-viboru-crm-dlia-pochatktivsiv/>
4. Hafiyak, A. CRM system as a component of modern intelligent management technologies. Intellectual technologies for managing transport processes. Kharkiv, 2020. 44-45.
5. Berestetska, O., Iankovets, T., Orozonova, A., Voitovych, S., Parmanasova, A., & Medvedieva, K. (2023). Using Crm Systems for the Development and Implementation of Communication Strategies for Digital Brand Management and Internet Marketing: eu Experience. *International Journal of Professional Business Review*, 8(4), e01613, doi: <https://doi.org/10.26668/businessreview/2023.v8i4.1613>
6. Dotsenko, N., Chumachenko, I., Galkin, A., Kuchuk, H. and Chumachenko, D. (2023), "Modeling the Transformation of Configuration Management Processes in a Multi-Project Environment", *Sustainability (Switzerland)*, Vol. 15(19), 14308, doi: <https://doi.org/10.3390/su151914308>
7. Dolgova L., Yamnenko H. Use of information system tools for automation of business processes of the enterprise *Economic Analysis*, Volume 31. No. 2. 2021. 90-97.

Received (Надійшла) 20.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.04.2024

Використання інструментарію CRM для забезпечення захисту прав інтелектуальної власності

Р. Бараненко, А. Мостова, Н. Сас, О. Курбанова

Анотація. У статті розглянуто основні аспекти використання CRM-систем в управлінні взаємовідносинами в компаніях за умови забезпечення прав інтелектуальної власності. Визначено, що захист прав інтелектуальної власності розглядають через призму розробки та впровадження системи правових норм, які потребують регулювання відносинами, що мають на меті необхідність створення та впровадження об'єктів інтелектуальної власності. Доведена необхідність захисту прав інтелектуальної власності, що опосередкована проектуванням, розробленням та використанням спеціального програмного забезпечення. На підставі аналізу сутності поняття інтелектуальної власності та визначено основні його складових, запропоновано впровадження спеціально розробленого програмного забезпечення. Обґрунтовано вибір програмного середовища та інструментів для реалізації візуального проектування запропонованої бази даних, що об'єднує всі етапи її розробки та впровадження в єдиному безшовному середовищі з метою ергономічності та оптимізації написання коду у відповідному середовищі сценаріїв, що має на меті забезпечення генерації та відтворення таблиць, порівнянні баз даних, синхронізації схем і даних, підготовки звітів та оптимізації методики та технології їх розсилки, а також швидкого та ефективного управління безпекою в базах даних. Представлено основні напрями реалізації CRM-стратегії управління та впровадження програмних розробок у організації роботи компанії, а також компоненти інформаційного забезпечення CRM-систем. Запропоновано методику впровадження CRM-стратегії у діяльність компанії. Спроектовано та розроблено інформаційну систему обліку діяльності компанії на засадах CRM-системи. Визначено основні особливості, переваги та недоліки використання CRM-систем у діяльності компанії. Наукова та практична корисність запропонованої інформаційної системи управління дозволяє покроково та покомпонентно аналізувати усі бізнес-процеси, приймати управлінські рішення з метою кращого співробітництва та правового забезпечення інтелектуальної власності в сучасному інформаційному просторі.

Ключові слова: CRM, інформаційна система, інформаційні технології, проектування, інтелектуальна власність.

С. Я. Бовчалюк, Б. М. Коломоець, В. С. Коломоець, Я. В. Гаращенко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

РОЗВИТОК МОДЕЛІ ТА СТРУКТУРИ КЕРУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ АРХІТЕКТУРОЮ

Анотація. Актуальність. За останнє десятиліття питанням розвитку і вдосконалення інформаційної технології паралельного логічного керування на базі ПЛІС-контролерів паралельної дії було присвячено не дуже багато уваги. У той же час в останніх дослідженнях було показано, що вдосконалення цієї технології, уведення до її складу нового функціоналу, дозволить значно розширити сфери її застосування не тільки для керування об'єктами критичного застосування, але і для побудови систем керування звичайними промисловими об'єктами. Одним із таких вдосконалень, що значно розширює функціонал ПЛІС-контролерів паралельної дії є уведення внутрішніх таймерів і лічильників. **Метою даної роботи** є вдосконалення математичної моделі і архітектури програмованого логічного контролера паралельної дії і розширення його функціональних можливостей, шляхом уведення до його складу програмованих таймерів. **Висновок.** За результатами проведених досліджень синтезовано структуру вдосконаленого логічного керуючого автомату паралельної дії, у якому додано можливість реалізації програмованих таймерів. Вдосконалено елементи математичної моделі ЛКА ПД, показано яким чином уведення додаткових внутрішніх змінних впливає на реалізацію основних математичних залежностей, що визначають його функціонування. На базі запропонованої структури і елементів математичної моделі з'являється можливість побудови вдосконаленого алгоритму функціонування і HDL-моделі для фізичної реалізації ПЛІС-контролера паралельної дії.

Ключові слова: технологія паралельного логічного керування, програмований логічний контролер паралельної дії, ПЛІС-контролер, внутрішній програмований таймер.

Вступ

В одній з останніх публікацій за напрямком дослідження інформаційної технології паралельного логічного керування, а саме – керуючих архітектур паралельної дії, було визначено пріоритетність уведення до таких структур внутрішніх програмованих користувачем таймерів і лічильників [1]. У той же час ні математичною моделлю, ні HDL-моделлю, ні алгоритмом функціонування ПЛІС-контролерів паралельної дії (ПД) не передбачено можливості реалізації подібного функціоналу [2-4]. До того ж для повноцінної реалізації вказаних функцій необхідна підтримка з боку мови програмування ПЛІС-контролерів ПД – ЯПЛК-М, а це також відкрите питання [5, 6].

До того ж аналіз моделей і структур програмованих керуючих автоматів паралельної дії (ПЛК ПД) свідчить про їх фактичну «негнучкість», «закритість» або, фактично, реалізацію за допомогою концепції «жорсткої логіки».

Тобто, не дивлячись на фізичну реалізацію таких керуючих структур на базі ПЛІС, що за своєю суттю дозволяють створювати гнучкопрограмовані системи, по факту ніяких змін у саму структуру керуючого автомату внести не має можливості [7].

Метою цієї роботи є вдосконалення математичної моделі і архітектури програмованого логічного контролера паралельної дії і розширення його функціональних можливостей, шляхом уведення до його складу програмованих таймерів.

Основна частина

На рис. 1 показано базову структуру сучасного ПЛІС-контролера паралельної дії, що покладено в основу промислових зразків і реалізовано на кристалах ПЛІС компанії Altera [8].

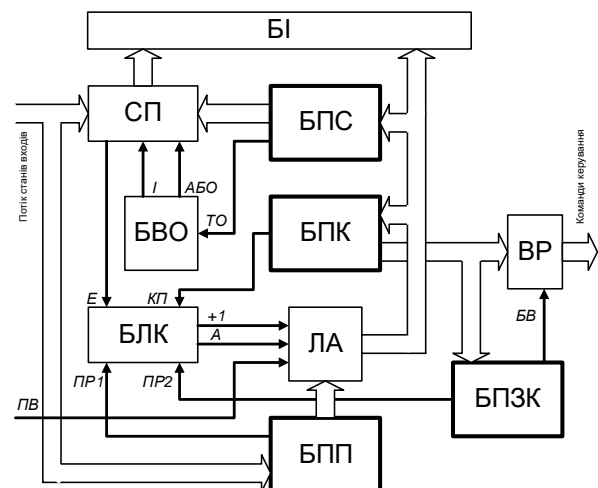


Рис. 1. Структура ПЛІС-контролера паралельної дії

Реалізація базових функцій логічного керування відбувається за рахунок перевірки істинності рівнянь, що записані у блок логічного керування:

$$A = КП \vee ПР1 \vee ПР2; \quad (1)$$

$$+1 = E \wedge \overline{КП} \wedge \overline{ПР1} \wedge \overline{ПР2} \quad (2)$$

де $КП$ – ознака кінця підпрограми; $ПР1$ – ознака переривання від БПП; $ПР2$ – ознака переривання від БПЗК; A – початкова адреса підпрограми; E – сигнал еквівалентності; $+1$ – сигнал переходу до наступного рядка.

Сам керуючий автомат складається із наступних блоків: блоку індикації – БІ; схеми порівняння – СП; блоку вибору операції – БВО; блоку логічного керування – БЛК; лічильника адреси – ЛА; вихідного регістра – ВР; а також блоків пам'яті станів, команд, переходів і заборонених комбінацій – БПС, BPK, БПП, БПЗК. Процес відпрацювання керуючої програми складається з двох етапів або частин:

залежності від того, який саме блок (БПК, або БПП) був ініціатором формування внутрішнього відліку часу. За значенням сигналу «Т» БЛК формує сигнал «+I», тобто ініціює перехід до наступного $i+1$ -го рядка поточної підпрограми. Таким чином логіка роботи з внутрішнім таймером відповідає логіці обробки сигналів детермінованих входів, з тою лише різницею, що при роботі з детермінованими входами схема порівняння (СП) очікує появи єдиної «дозволеної» комбінації вхідних сигналів, а при роботі з таймером «єдина дозволена» комбінація сформується «автоматично» через певний (запрограмований) проміжок часу. Отже формування сигналу «+I» відбуватиметься у відповідності до рівняння:

$$+1 = (E \vee T) \wedge \overline{KП1} \wedge \overline{KП2} \wedge \overline{ПР1} \wedge \overline{ПР2} \quad (3)$$

Якщо ініціатором відліку був БПП, то БВТ сформує сигнал «КП2», логіка роботи з яким повністю відповідає логіці роботи з сигналом «КП», якій у розглядаємії структурі отримав нову назву «КП1». Тобто перехід до іншої підпрограми буде можливий по закінченню сформованого внутрішнім таймером відліку часу, повністю аналогічно до ситуації, коли ознака кінця підпрограми фіксується БПК у звичайних умовах. Формування сигналу «А» в оновленій структурі відповідатиме наступному рівнянню:

$$A = КП1 \vee КП2 \vee ПР1 \vee ПР2 \quad (4)$$

На останок слід зазначити, що для повноцінної реалізації розглянутих функцій необхідно забезпечити підтримку з боку автоматизованої технології програмування TVP, а також внести зміни до синтаксису і семантики мови програмування ЯПЛК-М. Однак цій складовій частині інформаційної технології паралельного логічного керування буде присвячено окреме дослідження.

Висновки

За результатами проведених досліджень синтезовано структуру вдосконаленого логічного керуючого автомату паралельної дії, у якому додано можливість реалізації програмованих таймерів.

Вдосконалено елементи математичної моделі ЛКА ПД, показано яким чином уведення додаткових внутрішніх змінних впливає на реалізацію основних математичних залежностей, що визначають його функціонування.

На базі запропонованої структури і елементів математичної моделі з'являється можливість побудови вдосконаленого алгоритму функціонування і HDL-моделі для фізичної реалізації ПЛІС-контролера паралельної дії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Визначення напрямків розвитку керуючих пристроїв з паралельною архітектурою на базі ПЛІС / С. Я. Бовчалюк, О. М. Піскар'юв, С. С. Радченко // Системи управління, навігації та зв'язку.– Полтава: ПНТУ, 2023. – Вип. 1 (71). – С. 69-72.
2. Бовчалюк С. Я. Совершенствование математической модели и архитектуры логических управляющих автоматов параллельного действия / С. Я. Бовчалюк, И. А. Фурман // ИКСЗТ. – 2006. – №3(59). – С. 72–76.
3. Бовчалюк С. Я. Вдосконалення алгоритму функціонування програмованого логічного контролера паралельної дії / С. Я. Бовчалюк, І. О. Фурман // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2007. – №2 (64). – С. 38–42.
4. Бовчалюк С. Я. HDL-модель програмованого логічного керуючого автомата паралельної дії / С. Я. Бовчалюк, І. О. Фурман // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – №6 (25). – С. 202–205.
5. Бовчалюк С. Я. Методологія побудови, синтаксис та семантика мови програмування ПЛІС-контролерів паралельної дії / С. Я. Бовчалюк, І. А. Фурман // ИКСЗТ. –2007. – № 4 (66). – С. 38–44.
6. Pya Furman. Development and study of technological visual programming of logic control problems / Pya Furman, Stanislav Bovchaliuk, Alexander Allashev, Aleksey Piskarev // ЕЕЕЕТ. – 2017. – № 6/2 (90). –Р. 23–31.
7. Бовчалюк С. Я. Моделі, методи та засоби інформаційної технології паралельного логічного управління об'єктами залізничної автоматики: дис. ... к. т. н. 05.13.06 / Бовчалюк Станіслав Ярославович. –Харьков, 2008. –203 с.
8. Бовчалюк С. Я. Нова інформаційна технологія логічного управління в енергетиці та на транспорті / С. Я. Бовчалюк // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ навігації і управління, 2007. – Вип. 3 – С. 47-51.

Received (Надійшла) 06.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.04.2024

Development of model and structure of control devices with parallel architecture

Stanislav Bovchaliuk, Borys Kolomoets, Vladyslav Kolomoets, Yaroslav Garashchenko

Abstract. Topicality. Over the past decade, not much attention has been devoted to the development and improvement of information technology of parallel logic control based on parallel FPGA controllers. At the same time, recent studies have shown that the improvement of this technology, the introduction of new functionality into its composition, will allow to significantly expand the scope of its application not only for the control of objects of critical application, but also for the construction of control systems for ordinary industrial objects. One such improvement that greatly expands the functionality of parallel FPGA controllers is the introduction of internal timers and counters. **The purpose of this work** is to improve the mathematical model and architecture of the parallel action programmable logic controller and expand its functionality by introducing programmed timers into its composition. **Conclusion.** According to the results of the conducted research, the structure of an improved logical control automaton of parallel action was synthesized, in which the possibility of implementing programmable timers was added. The elements of the mathematical model of LKA PD have been improved, it has been shown how the introduction of additional internal variables affects the implementation of the main mathematical dependencies that determine its functioning. On the basis of the proposed structure and elements of the mathematical model, it becomes possible to build an improved functioning algorithm and an HDL model for the physical implementation of a FPGA controller of parallel action.

Keywords: technology of parallel logic control, programmable logic controller of parallel action, FPGA controller, internal programmable timer.

С. С. Бульба¹, О. І. Соловйова², Ю. О. Семеренко²

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

² Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНОГО ШЛЯХУ

Анотація. Обширні області застосування алгоритмів пошуку оптимального шляху призводить до необхідності ретельного їх дослідження. Метою даної роботи є проведення дослідження існуючих методів пошуку оптимального шляху в залежності від особливостей вхідних даних та цілей оптимізації. У статті розглядаються такі види алгоритмів як: алгоритми на основі графів та на основі евристики. У роботі було проведений аналіз сфери застосування наведених алгоритмів. Визначені переваги та недоліки використання алгоритмів в залежності від області використання. Досліджено складності застосування в залежності від обчислювальних потужностей та часу обробки вхідних даних. Представлені дослідження дають змогу отримати інформацію про достовірність результатів роботи алгоритмів що розглядаються в залежності від вхідної сукупності параметрів для обчислення.

Ключові слова: алгоритм, програмування, розподіл ресурсів, граф, оптимальний шлях.

Вступ

У сучасному світі все більше виникає необхідність в побудові різних систем та засобів підвищення якості та комфорту життя людини. З такими викликами все частіше зустрічаються в області інформаційних технологій, а отже необхідно досліджувати існуючі та розробляти нові методи вирішення задач що виникають.

На даний момент більшість користувачів обчислювальних машин не можуть уявити своє існування без навігації на картах, швидкої передачі даних через інтернет, швидкої та дешевої доставки товарів. Також, швидко розвиваються такі напрямлення як: системи безпілотного керування автомобілем, навігація персонажів в відеоіграх, планування маршруту руху для роботів.

В усіх розглянутих сферах, для пошуку ефективного руху та доставки використовують методи та алгоритми пошуку оптимального шляху [1–10].

Алгоритми пошуку оптимального шляху класифікуються за такими критеріями як: тип вхідних даних, та принципом роботи. В залежності від критерію алгоритми можна розподілити на такі групи як:

- алгоритми на основі графів;
- алгоритми на основі штучного інтелекту;
- алгоритмів на основі евристик;
- алгоритми на основі випадкових методів;
- алгоритми на основі комбінаторної організації;
- алгоритми на основі нейронних мереж.

Кожний з наведених видів алгоритмів призначений для вирішення певної задачі, а отже необхідно розуміти коли і який потрібно використовувати щоб отримати оптимальний, або наближений до оптимального результат при мінімальних витратах на обчислювальну потужність та час виконання [11].

Розуміння основних переваг та недоліків роботи алгоритмів що розглядаються дає змогу розробникам та програмістам проектувати швидкі та зручні системи що вирішують поставлену перед ними задачу.

Мета роботи – дослідження існуючих методів пошуку оптимального шляху в залежності від особливостей вхідних даних та цілей оптимізації.

Дослідження спрямоване на виявлення оптимальних стратегій використання алгоритмів пошуку шляху в залежності від області використання.

1. Алгоритми на основі графів

До алгоритмів даного типу відносяться ті, які для побудови шляху використовують такі вхідні дані як граф. Граф G це впорядкована пара

$$G = (V, E), \quad (1)$$

де V – непорожня множина вузлів та вершин, E – множина пар вершин що називаються ребрами.

Вершини u та v називаються кінцевими вершинами (або просто кінцями) ребра $e = \{u, v\}$. Ребро, своєю чергою, з'єднує ці вершини. Дві кінцеві вершини того самого ребра називаються суміжними

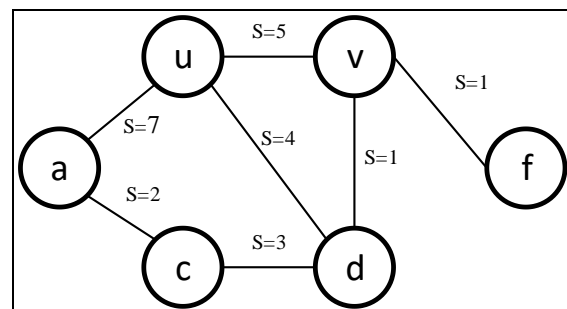


Рис. 1. Ненаправлений граф

Існують різні постановки задачі про найкоротший шлях:

1. Завдання про найкоротший шлях до заданого пункту призначення. Потрібно знайти найкоротший шлях у задану вершину призначення t , який починається у кожній з вершин графа (крім t). Змінивши напрям кожного ребра, що належить графу, це завдання можна вести до завдання про єдину вихідну вершину (в якій здійснюється пошук найкоротшого шляху із заданої вершини у всі інші).

2. Завдання про найкоротший шлях між заданою парою вершин. Потрібно знайти найкоротший шлях із заданої вершини u задану вершину v .

3. Завдання про найкоротший шлях між усіма парами вершин. Потрібно знайти найкоротший шлях

з кожної вершини u до кожної вершини v . Це завдання теж можна вирішити за допомогою алгоритму, призначеного для вирішення задачі про одну вихідну вершину, проте зазвичай вона вирішується швидше.

Через різну постановку завдань існує велика кількість алгоритмів для їх розв'язання, до них відносяться:

- Алгоритм Дейкстри;
- Алгоритм А*;
- Алгоритм Беллмана-Форда;
- Алгоритм Флойда-Уоршелла.

2. Алгоритм Дейкстри

Алгоритм пошуку найкоротших шляхів взваженого графу від одного з його вузлів до всіх інших. Даний алгоритм застосовується лише на графах з невід'ємними вагами ребра.

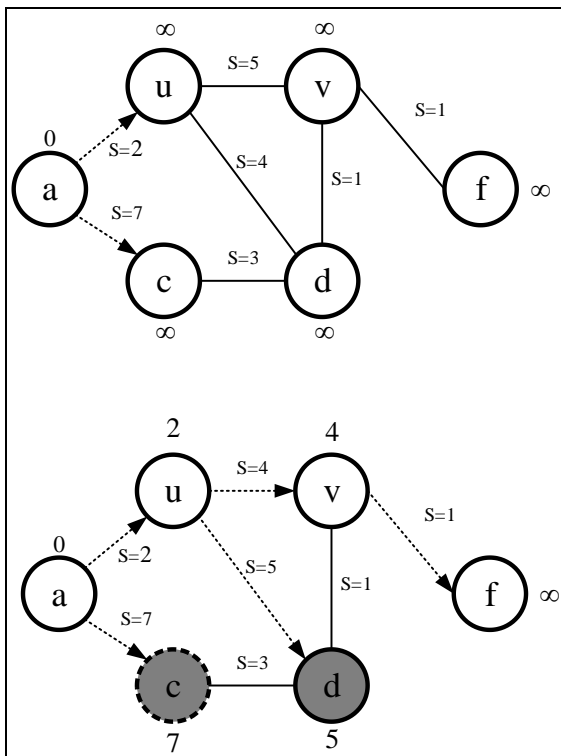


Рис. 2. Кроки алгоритму Дейкстри

Алгоритм Дейкстри складається з наступних кроків:

1. Встановіть початковий вузол і відстань від нього до всіх інших вузлів рівною нескінченності, а відстань від нього до себе рівною нулю.
2. Оберіть вузол з мінімальною відстанню від початкового вузла. Позначте його як відвіданий.
3. Для кожного сусіднього вузла, який ще не відвіданий, перерахуйте відстань від початкового вузла через поточний вузол. Якщо ця відстань коротша, оновіть відстань.
4. Повторюйте кроки 2 і 3, поки всі вузли не будуть позначені як відвідані.

Алгоритм завершується, коли всі вузли позначені як відвідані. На цей момент будуть знайдені найкоротші шляхи від початкового вузла до всіх інших вузлів.

3. Алгоритм А*

Алгоритм А* – алгоритм пошуку найкоротшого шляху в графі. Він комбінує в собі евристичні методи та пошук з найкоротшим шляхом. А* використовує оцінки відстаней до кінцевої точки разом з вартістю пройденого шляху, щоб визначити, яку вершину розглядати наступною [12]. До основних кроків даного алгоритму можна віднести:

1. Встановіть початковий вузол. Позначте його як поточний. Встановіть вартість шляху від початкової вершини до нього та оцінку відстані до кінцевої точки (евристична оцінка).

2. Повторюйте кроки пошуку, доки не досягнете кінцевої точки або не перевірите всі можливі шляхи. Обчисліть оцінку "ціни" пройденого шляху плюс оцінку відстані до кінцевої точки (евристичну оцінку) для кожної сусідньої вершини. Оберіть сусідню вершину з найменшою оцінкою. Позначте обрану вершину як поточну.

3. Коли досягнута кінцева точка або відсутній шлях, або всі можливі шляхи перевірені, завершіть алгоритм.

4. Алгоритм Беллмана-Форда

Алгоритм Беллмана-Форда – це алгоритм пошуку найкоротших шляхів від одного визначеного вузла до всіх інших вузлів взваженого напрямленого графа, навіть якщо в графі присутні ребра з від'ємними вагами.

До кроків даного алгоритму можна віднести:

1. Встановлення початкового вузла та встановлення відстаней до всіх інших вузлів як нескінченності, за винятком відстані до самого себе, яка рівна нулю.

2. Повторюється $|M|-1$ разів де M – кількість вузлів у графі. На кожній ітерації проходиться по всім ребрам графа і оновлюються відстані до кожного вузла, якщо можна скоротити відстань, пройшовши через поточне ребро.

3. Після $|M|-1$ ітерацій перевіряється, чи існують від'ємні цикли. Якщо відстань до будь-якого вузла може бути зменшена після ще однієї ітерації, це означає, що у графі є від'ємний цикл, який нескінченно зменшує відстань до певного вузла [13, 14].

Цей алгоритм дозволяє знайти найкоротші шляхи в графі, включаючи графи з від'ємними вагами, але він може бути менш ефективним у порівнянні з іншими алгоритмами, такими як Дейкстри або А*, через свою складність

5. Алгоритм Флойда-Уоршелла

Алгоритм пошуку всіх найкоротших шляхів між кожною парою вершин в орієнтованому або неорієнтованому зваженому графі. Цей алгоритм найбільш ефективний для використання на графах зі зваженими ребрами, що можуть містити від'ємні ваги. Основна ідея алгоритму полягає в тому, щоб поступово покращувати відомі шляхи між вершинами, додаючи нові проміжні вершини до поточного найкращого шляху. Даний алгоритм працює коректно, якщо у графі немає циклів негативної величини, а у разі,

коли такий цикл є, дозволяє знайти хоча б один такий цикл [15].

Складається з таких кроків як:

1. Встановити вагу прямих ребер між вершинами як вагу відповідного ребра. Якщо прямого ребра немає, вага встановлюється як нескінченність. Також встановлюємо вагу вершини до себе самої як 0.

2. Провести ітерації по всім парам вершин, де для кожної пари перевіряємо, чи можливо покращити шлях між цими вершинами, проходячи через поточну вершину. Якщо так, оновлюємо вагу шляху.

3. Повторюємо цей процес для кожної вершини як проміжної вершини у шляху, поки не досягнемо оптимального розв'язку.

4. Після завершення алгоритму ми матимемо матрицю, в якій кожен елемент буде містити вагу найкоротшого шляху від вершини u до вершини v .

Алгоритм Флойда-Уоршелла гарантує знаходження коректних найкоротших шляхів між усіма парами вершин у графі.

Однак його складність становить $O(M^3)$, що робить його неефективним для великих графів.

Висновок

Досліджено існуючих методів пошуку оптимального шляху в залежності від особливостей вхідних даних та цілей оптимізації.

Розглянуті алгоритми на основі графів та їх евристики.

У роботі було проведений аналіз сфери застосування наведених алгоритмів.

Визначені конкретні переваги та недоліки використання алгоритмів в залежності від області використання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Barnes E. R. An algorithm for partitioning the nodes of a graph // *SIAM J. Algebraic Discrete Methods*. – 1982. – Vol. 4, no. 3. – P. 541-550.
- Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
- Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускної здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
- Главчева Ю. М., Главчев М. І., Канишева О. В., Кучук Г. А. Розробка підходу для ранжування академічних установ за показниками наукової діяльності. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Т. 3, № 1. С. 63–70.
- Dun, B., Zakovorotnyi, O. and Kuchuk, N. (2023), “Generating currency exchange rate data based on Quant-Gan model”, *Advanced Information Systems*, Vol. 7, no. 2, pp. 68–74, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.2.10>
- Datsenko, S. and Kuchuk, H. (2023), “Biometric authentication utilizing convolutional neural networks”, *Advanced Information Systems*, Vol. 7, no. 2, pp. 87–91, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.2.12>
- Petrovska, I. and Kuchuk, H. (2023), “Adaptive resource allocation method for data processing and security in cloud environment”, *Advanced Information Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 67–73, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.10>
- Krepych, S., & Spivak, I. (2021). Improvement of svd algorithm to increase the efficiency of recommendation systems. *Advanced Information Systems*, 5(4), 55–59. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.08>
- Кучук Г.А. Мінімізація завантаження каналів зв'язку обчислювальної мережі / Г.А. Кучук // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 1998. – Вип. 1(5). – С. 149-154.
- Shmatko, O., Kolomiitsev, O., Reкова, N., Kuchuk, N. and Matvieiev, O. (2023), “Designing and evaluating dl-model for vulnerability detection in smart contracts”, *Advanced Information Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 41–51. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.4.05>.
- Fakcharoenphol J., Rao S. Planar graphs, negative weight edges, shortest paths, and near linear time // *Proc. 42nd IEEE Symp. Foundations of Computer Science*. – 2001. – P. 232-241.
- Goldberg A. V., Harrelson C. Computing the shortest path: A*-search meets graph theory // *Proc. Sixteenth Annual ACM-SIAM Symp. on Discrete Algorithms*, January 23-25, Vancouver, BC (2005). – P. 156-165.
- Timothy M. Chan. More algorithms for all-pairs shortest paths in weighted graphs. In *STOC07*, pages 590–598, 2007.
- Seth Pettie. A new approach to all-pairs shortest paths on real-weighted graphs. *Theoretical Computer Science*, 312:47–74, 2004.
- Edward M. Reingold, Jurg Nievergelt, and Narsingh Deo. *Combinatorial Algorithms: Theory and Practice*. Prentice-Hall, Inc., 1977.

Received (Надійшла) 20.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.04.2024

Study of algorithms for searching the optimal path

S. Bulba, O. Solovyova, Y. Semerenko

Abstract. Extensive areas of application of optimal path search algorithms lead to the need for their thorough research. The purpose of this work is to conduct a study of existing methods of finding the optimal path depending on the characteristics of input data and optimization goals. The article considers such types of algorithms as: algorithms based on graphs and based on heuristics. In the work, an analysis of the scope of application of the above algorithms was carried out. The advantages and disadvantages of using algorithms are defined depending on the area of use. The complexity of the application, depending on the computing power and the time of processing the input data, was studied. The presented studies make it possible to obtain information about the reliability of the results of the considered algorithms depending on the input set of parameters for calculation.

Keywords: algorithm, programming, distribution, graph, optimal path, artificial intelligence.

М. О. Волк, В. С. Курочкін, А. П. Запорожченко, П. А. Паронікян

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ГІБРИДНИЙ МЕТОД РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ В ХМАРНИХ СИСТЕМАХ

Анотація. Об'єктом досліджень є процес управління ресурсами в хмарних системах. Мета статті полягає у підвищенні ефективності хмарних систем шляхом розробки метода розподілу віртуальних машин в системах хмарних обчислень. Предметом статті виступають методи розподілу віртуальних машин та завдань в системах хмарних обчислень. У роботі розглядаються різні методи розподілу ресурсів в системах хмарних обчислень. На основі проведеного аналізу зроблено висновки про їх недоліки та переваги. В результаті дослідження отримано гібридний метод розподілу віртуальних машин за комп'ютерними ресурсами та пакетів завдань за віртуальними машинами. Експериментальні результати підтверджують підвищення ефективності запропонованого методу у порівнянні з існуючими за рахунок зниження енергоспоживання та часу виконання і збільшення коефіцієнту використання процесорних модулів.

Ключові слова: хмарні системи, хмарні обчислення, управління, метод, розподіл ресурсів, планування, віртуальні машини, віртуалізація, застосунок, програмне завдання

Вступ

Хмарні обчислення сьогодні пропонують нові методи динамічного аналізу та підтримки великих і віртуалізованих даних та послуг в Інтернеті. Хмарні системи – це структури, які забезпечують доступ за вимогою до розосередженої колекції ресурсів, таких як хости, пристрої зберігання даних, процесорні елементи, спеціалізовані пристрої та інше [1].

Хмарні обчислення пропонують передові тенденції в генерації інформації та знань, які включають інформацію, отриману починаючи з робочого столу користувача до великих статистичних систем обробки та інформації. Часто доступ до цієї інформації реалізується через веб-додатки згідно хмарної моделі надання услуги.

Обчислювальна можливість хмарних систем забезпечуються датацентрами, які розкидані по всьому світу та об'єднані високошвидкісними комп'ютерними мережами. Хмара може бути ефективною розподіленою системою збору, обробки та зберігання інформації. Її послуги розповсюджуються між клієнтами з віддаленими комп'ютерними ресурсами в конкретний момент часу через Інтернет. В роботі [2] припускають, що підходи до керування ресурсами повинні синхронізувати контури управління хмарою як з боку споживачів хмари, так і з боку провайдерів.

Розподіл ресурсів (анг. Resource Allocation, RA) від постачальників до клієнтів дозволяє динамічно перерозподіляти програмні завдання та потоки даних в реальному часі, що надає користувачеві можливість кращого використання наявних потужностей. Розподіл ресурсів у хмарних системах – це процес розподілу віддалених ресурсів через комп'ютерну мережу для виконання відповідних хмарних програм. На високому рівні абстракції модель такого механізму розподілу ресурсів отримала назву Інфраструктура як послуга (IaaS) і надає комп'ютерні ресурси за запитами користувачів завдяки попередньо визначеному або динамічному механізму розподілу ресурсів. Для організації обчислень необхідно вирішити дві задачі: розподілити віртуальні машини за

ресурсами, а програмні завдання за віртуальними машинами.

Аналіз публікацій та постановка проблеми

Було проведено аналіз методів та алгоритмів розподілу ресурсів на хмарних платформах, які наявні у відкритій літературі, хоча треба відмітити, що ряд комерційних планувальників ресурсів мають закритий код без інформації про реалізовані методи розподілу. Під час розподілу ресурсів у хмарних системах враховуються численні фактори, такі як висока продуктивність, вартість, максимальна пропускна здатність, якість обслуговування SLA (Service-level agreement). Нижче наведено огляд деяких досліджень, що безпосередньо стосуються задачі розподілу ресурсів.

В роботі [3] для оптимізації хмарного планування пропонується техніка, заснована на ретельному дослідженні хмарних систем на рівні IaaS. Її особливістю є гнучкий метод поширення віртуальних машин для найкращого використання фізичних ресурсів з дотриманням політики автоматизованого розвитку.

Необхідність постійного контролю порушення SLA для мінімізації вартості розглядається у [4] на базі множини критеріїв SLA, які слід перевірити у реальному часі під час розподілу послуг. В даній роботі було оцінено механізм планування з кількома параметрами SLA.

Одною з проблем хмарних обчислень є бажання клієнтів отримувати максимум ефективності від ресурсів, які вони використовують. Якщо ця проблема не вирішується провайдером, хмарну систему в цілому можна вважати неефективною. Рішення проблеми можливо тільки динамічними методами, тому що ситуація в хмарі та між клієнтами постійно змінюється. Динамічний розподіл ресурсів і найкраще їх використання протягом встановленого періоду обговорюється у [5]. В роботі обговорюється модель розподілу ресурсів на основі правил, яка проводить розподіл ресурсів відповідно до важливості (пріоритетності) завдання для уникнення неефективного використання ресурсів. Але додаткові дії

обмежують терміни виконання проектів Real-Time.

В роботі [6] запропонована ідея федеративної обчислювальної та мережевої система (FCN) для обробки спільного розподілу обчислювальних та комунікаційних ресурсів. Обговорюється проблема перевантаження у випадках, коли запит користувача вимагає виділення різноманітних ресурсів (наприклад, процесорів, пам'яті, серверу зберігання та інше). Дослідження сценаріїв, що призводять до перевантажень, відмов та збоїв проведено в роботі [7] привило до розроблення механізму контролю перевантаження. Різні ресурси зазвичай виділяються одночасно для обслуговування запиту користувача, тому метод підвищує ефективне управління ресурсами. В роботі [8] ресурси об'єднуються в систему хмарних обчислень з урахуванням обмежень на спожиту електроенергію. Також враховуються можливості автоматизованого адміністрування та пропускна здатність комунікаційного обладнання. Ще одним плюсом є оцінка здатності забезпечення SLA.

Робота [9] описує модель розподілу ресурсів з використанням SLA на прикладі постачальників хмарних послуг. В моделі використовується поняття рівноваги Неша з теорії ігор щодо розподілу ресурсів між користувачами. Постачальники ресурсів та споживачі розглядаються в рамках гри, де об'єктами виступають мультихмарні послуги.

Існують ряд досліджень щодо оптимізації хмарних ресурсів, засновані на евристичних алгоритмах, підказаних природою. Метод мурашиних колоній [10] використано для призначення ресурсів споживачам. Пошук їжі мурахами визначає ідею даного алгоритму. За допомогою цього підходу шляхи пошуку кращого рішення можуть бути коротшими. Оптимізація методом плодової мушки було запропоновано в роботі [11] для розподілу ресурсів і управління завданнями у хмарі.

Удосконалений метод k-середніх на основі пріоритетів запропоновано у роботі [12]. Завдяки цьому методу розподіл ресурсів можна зробити більш ефективним, тим самим зменшивши витрати. Авторами роботи представлено оптимізаційний алгоритм для зменшення витрат на реалізацію, з виконанням вимог клієнтів. Методика має специфічну направленість на використання в хмарних датацентрах. Для доступу та управління використовується веб-інтерфейс. В основі лежить генетичний алгоритм, що використовується для прогнозування. На основі статистичної інформації прогнозується чи будуть доступні ресурси. Отримані дані прогнозування використовуються для розгортання віртуальних машин.

Незважаючи на те, що загалом запропоновано багато рішень щодо планування, непередбачуваності, споживання енергії, перевантаження, порушення SLA та інші проблеми приводять до ситуації, що жоден з пропонуєваних методів не може досягти оптимального розподілу ресурсів, особливо у реальному часі.

Мета статті полягає у підвищенні ефективності хмарних систем шляхом розробки метода розподілу віртуальних машин в системах хмарних обчислень.

Гібридний метод розподілу ресурсів в хмарних системах

У статті пропонується метод розміщення віртуальних машин та програмних завдань на основі комбінації генетичного алгоритму [13] та алгоритму випадкового лісу (Random forest) [14]. На першому етапі методу генетичний алгоритм створює початкову схему призначення. Алгоритм випадкового лісу навчається за допомогою даних від генетичного алгоритму та реалізує техніку оптимізації. Віртуальні машини розподіляються між фізичними комп'ютерами на першому етапі, а завдання за віртуальними машинами – на другому. Таким самим пропонується гібридна модель, що послідовно використовує генетичний алгоритм та метод випадкового лісу для керування ресурсами хмари. Навчальний набір формується з множини ресурсів, віртуальних та фізичних машин. При застосуванні генетичного алгоритму отримується схема призначення – відображення множини віртуальних машин на множину наявних фізичних машин $VM > PM$. Алгоритм включає наступні кроки, що показано на рис. 1.



Рис. 1. Етапи генетичного алгоритму

Крок 1: ініціалізація множин завдань, ресурсів.

Крок 2: обчислення функції допасованості за одним з обраних критеріїв (енергоспоживання, час виконання, коефіцієнт використання ресурсу).

Крок 3: відбір варіантів з найліпшими функціями допасованості та виконаними угодами про рівень послуг (SLA).

Крок 4: схрещування. Проводиться для отримання нових потомків з новим правилом призначення віртуальної машини наявному ресурсу. Для алгоритму обрано 2-точкове схрещування.

Крок 5: мутація – передбачає перебалансування, заміну, переміщення за умов покращення оцінок розподілу.

Крок 6: отримання нового покоління (нової схеми призначення), перехід до етапу еволюції.

Експериментально встановлено кількість еволюцій за критеріями часу виконання та якості отриманої схеми розподілу. Рекомендується кількість еволюцій знаходиться у діапазоні 30-40.

Розподіл віртуальних машин між фізичними виконується наступним чином. Вхідними даними виступають двоє батьків із схеми розподілу. Кожен з батьків має хромосоми, які характеризують параметри віртуальної та фізичної машин (гени). Результатом є нащадки, кожен з яких прагне покращити співвідношення генів (відповідних характеристик ресурсу та віртуальної машини). Мутація відбувається тоді, коли один з потомків покращує популяцію (схему призначення). Критерієм завершення генетичного алгоритму встановлена фіксована кількість циклів. Подальше застосування алгоритму не дає значного росту ефективності, але призводить до збільшення часу планування.

На другому етапі методу застосовується алгоритм випадкового лісу. Формування більшої кількості дерев (можливих схем розподілу завдань за віртуальними машинами) означає більшу стійкість та гарантує близькість до оптимального результату. Кожен вузол випадкового лісу обирає невелику кількість параметрів для оцінки розподілу, для яких обчислюється покращення характеристик.

На кожній ітерації отримується прогноз з кожного дерева, а потім обирається найкращий варіант шляхом "голосування більшістю" (для одного критерію) або "голосуванням за ефективність" (у випадку сукупного критерію ефективності). Виконання алгоритму випадкового лісу починається після встановлення віртуальних машин на фізичні. Фізична машина може отримати одне, два або більше віртуальних машин для виконання, віртуальна машина може виконувати одне, два або більше програмних застосувань з завдань. При цьому можливе перенавантаження фізичної машини. Для вирішення цього типу сценарію використовується техніка міграції віртуальних машин та програмних застосувань. У випадку перевантаження фізичної машини, деякі з віртуальних машин переносяться на інші фізичні, які мають менше навантаження, забезпечуючи балансування навантаження на всі фізичні машини в центрі обробки даних [15–17]. Для перевірки запропонованого методу використано середовище моделювання CloudSim 4.0, що пропонує моделі надання хмарних послуг та віртуалізовані ресурси. Моделювання проводилося на 32 віртуальних машинах, які працювали на платформі Azure (фірми Microsoft) в пакеті Standard_B4ms, що розгорталася на фізичних машинах з процесорами Intel® Xeon® Platinum 8370C (Ice Lake) та базовою продуктивністю процесора 22%.

В якості першого критерія ефективності використовувалось енергоспоживання. Фізичні машини споживають енергію, а уся спожита енергія дорівнює сумі усіх пристроїв споживання енергії, які обслуговують виконання обчислень. Наступним критерієм був час виконання завдань. З точки зору провайдера та користувачів хмарних послуг, дуже важливо виконати запити на обчислення якомога швидше. На рис. 2 показано порівняння енергоспоживання щодо розробленого та існуючих методів, а саме, на основі мурашиного алгоритму та оптимізації рою частинок (PSO).

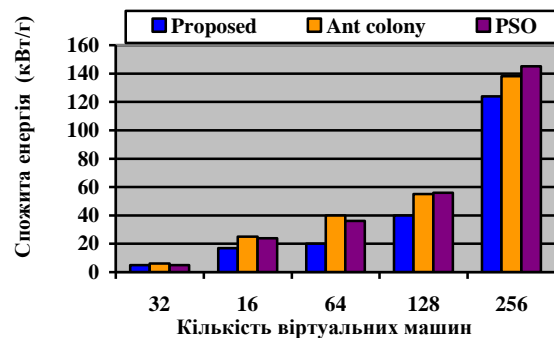


Рис. 2. Оцінка енергоспоживання

Кожен вузол має окремий процесор з чотирма ядрами, оперативну та зовнішню пам'ять. В експериментах для різних методів розподілу ресурсів використовувалась одна конфігурація комунікаційного обладнання для передачі даних та конфігурація пакета програмних завдань на обчислення. З отриманих даних можна зробити висновок, що енергоспоживання у випадку використання розробленого методу нижче за випадків використання існуючих методів. Зниження енергоспоживання досягає 6-8%.

На рис. 3. показана залежність часу виконання пакету завдань (містив 500 програмних компонентів) на віртуальних машинах.

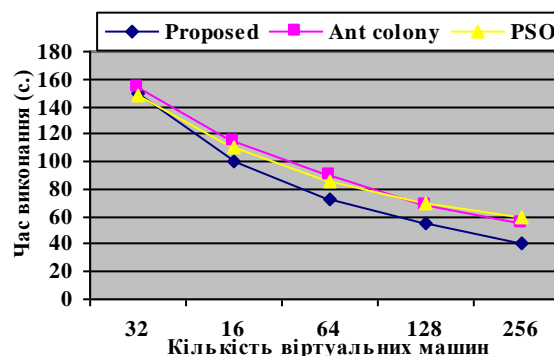


Рис. 3. Оцінка часу виконання

Аналіз результатів показує, що запропонований метод показує менший час виконання в порівнянні з існуючими алгоритми. Середній показник зменшення часу склав 10-12%.

Висновки

Авторами запропоновано гібридний метод розподілу віртуальних машин в системах хмарних об-

числень. Серед найбільш важливих можливостей, що надає метод, є зменшення енергоспоживання та часу виконання завдань при встановленому рівні SLA. Отримані результати є важливими, тому що стандартні методи управління розподіленими хмарними системами є дуже ресурсозатратними. Якщо порівняти дані експериментів, можна зробити висновки, що час обчислень зменшується більшими темпами ніж енергоспоживання. Це можна поясни-

ти: обчислювальна складність завдань не змінюється, тому зменшення часу виконання відбувається шляхом оптимального використання процесорів, які збільшують кількість обчислень на одиницю часу, що призводить до зростання енергоспоживання.

Напрямок подальших досліджень методу є розроблення модифікацій методу з урахуванням таких критеріїв ефективності як вартість обчислень, забезпечення функціональної стійкості до відмов.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kim W. Cloud computing architecture. *International Journal of Web and Grid Services*. Vol. 9, No.3. 2013. P. 287-303. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJWGS.2013.055724>
2. Mary M., Mahalakshmi D. An extensive survey on resource allocation mechanisms in cloud computing. *PalArch's Journal of Archaeology of Egypt/Egyptology*. Vol. 17. No 9. 2020. P. 45–56.
3. Mohan N., Raj E. Resource allocation techniques in cloud computing—research challenges for applications. *Computational Intelligence and Communication Networks*, Vol. 6. 2021. P. 101–123. DOI: 10.1109/CICN.2012.177
4. Prodan R., Ostermann R. A survey and taxonomy of infrastructure as a service and web hosting cloud providers. *Grid Computing*. Vol. 10. 2019. P. 45–57. DOI: 10.1109/GRID.2009.5353074
5. Filimonchuk T., Volk M., Ruban I., Tkachov V. Development of information technology of tasks distribution for grid-systems using the GRASS simulation environment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling system*, 2016. Vol. 3/9 (81). pp. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71892>
6. Kumar K., Feng J., Nimmagadda Y., Lu Y. Resource allocation for real-time tasks using cloud computing. *Computer Communications and Networks*. Vol. 3. 2011. P. 21–30. DOI: 10.1109/ICCCN.2011.6006077
7. Гора М., Волк М. Моделі управління ресурсами для забезпечення функціональної стійкості процесу розподілених обчислень. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2023. No 4(87). С. 244-251. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.28>
8. Mamchych O., Volk M. Smartphone Based Computing Cloud and Energy Efficiency. 12th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece. 2022. P.1-5, DOI: 10.1109/DESSERT58054.2022.10018740
9. Chen J., Tsai C., Lu S. Resource reallocation based on SLA requirement in cloud environment. *IEEE Transactions on Services Computing*, Vol. 25. 2020. P. 89–102. DOI: 10.1109/ICEBE.2015.70
10. Yang Z., Liu M., Xiu J., Liu C. Study on cloud resource allocation strategy based on particle swarm ant colony optimization algorithm. *Cloud Computing and Intelligence Systems*. Vol. 2. 2012. P. 67–80. DOI: 10.1109/CCIS.2012.6664453
11. Zheng X. A Pareto-based fruit fly optimization algorithm for task scheduling and resource allocation in cloud computing environment. *IEEE Transactions on Services Computing*. Vol. 12. 2016. P. 112–121. DOI: 10.1109/CEC.2016.7744219
12. Goutam S., Yadav A. Preemptible priority-based dynamic resource allocation in cloud computing with fault tolerance. *International Journal of Communication Networks*. Vol. 12. No. 3. 2015. P.67–76. DOI: 10.1109/ICCN.2015.54
13. Tseng F., Wang X., Chou L., Chao H., Leung V. Dynamic resource prediction and allocation for cloud data centre using the multi-objective genetic algorithm. *IEEE Systems Journal*. Vol. 12. 2018. P.1688–1699. DOI: 10.1109/JSYST.2017.2722476
14. Wei L. Genetic Algorithm Optimization of Concrete Frame Structure Based on Improved Random Forest. *International Conference on Electronics and Devices, Computational Science (ICEDCS)*. Marseille, France. 2023. P. 249-253, DOI: 10.1109/ICEDCS60513.2023.00051
15. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
16. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускну здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
17. Ivanisenko I.M., Volk M.O. Simulation methods for load balancing in distributed computing. *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 27 – October 2, 2017. P. 690-695. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110078

Received (Надійшла) 27.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.04.2024

Hybrid Method of Recourse Allocation in Cloud Systems

Maksym Volk, Vladyslav Kurochkin, Anton Zaporozhchenko, Papin Paronikian

Abstract. The object of research is the process of resource management in cloud systems. The purpose of the article is to increase the efficiency of cloud systems by developing a method for distributing virtual machines in cloud computing systems. The subject of the article is the methods of distribution of virtual machines and tasks in cloud computing systems. The work considers various methods of resource allocation in cloud computing systems. Based on the analysis, conclusions were made about their disadvantages and advantages. As a result of the study, a hybrid method of distributing virtual machines by computer resources and task packages by virtual machines was obtained. The experimental results confirm the improvement of the efficiency of the proposed method in comparison with the existing ones due to the reduction of energy consumption and execution time and the increase of the utilization ratio of processor modules.

Keywords: cloud systems, cloud computing, management, method, resource allocation, planning, virtual machines, virtualization, application, software task.

Mykhailo Hulevych

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

CIDER : ASSISTED AUTOMATION TOOL FOR C++ LIBRARIES TESTING

Abstract. Software testing is one of the most important parts of a product development lifecycle (PDL). Companies face significant risks associated with program failures, including financial and reputational ones, having an interest in investing time and money in new testing and quality assurance practices. The programs written in C++ are known as high performant, but complex due to the language specifics. At the same time automated tools that are available mostly for GUI programs can't help with native modules regression testing. Thus, even partial automation of such processes can have a positive effect on PDL in terms of regression testing effectiveness. The article considers a testing technique of recording and playback of program execution on the component level. The proposed tool generates testing scenarios during the execution of a program, giving the ability to perform manual testing and extend the automated component tests execution database. The experiments showed that such scenarios' code coverage results are at a high level and tend to improve when applying optimization algorithms.

Keywords: test automation, script generation, regression testing, C++, optimization, harmony search, code coverage.

Introduction

The modern world has high security challenges making companies invest in security measures while developing complex systems. The software written in C++ consists of a high number of components interacting with each other via a public interface. In general, such components may exchange data not only in the same process but on different machines, which adds additional complexity to testing. Isolation of a component removes redundant complexity and aims to verify that each part of the whole behaves as expected. In addition, the component tests are usually written in scripting languages other than the original component under test by automation test engineers to aim for the problematic branches of execution and specific input data.

At the same time, automatic tests generation for C++ programs question has been a topic of interest in recent years. While automated unit testing tools and techniques have been widely studied and applied in software engineering, including for languages like Java and Python, the unique characteristics of C++ present additional challenges. While significant progress has been made in automatic unit test generation for C++ programs, challenges remain, including the handling of complex language features, such as templates, macros, and pointer arithmetic, as well as the need to balance test effectiveness, efficiency, and scalability, which one of the key parts of C++ language philosophy.

Recent publications. CIRTUS [1] automated unit testing tool for C++ programs generates test suites for unit testing based on source code analysis and method sequences generation, improves the code coverage by applying the *libfuzzer* to change the values of generated method's arguments. The tool has shown an ability to produce the test suites that achieve a high value of branch and statement coverage (up to 95% on one of the experimental setups).

KLOVER [2] uses symbolic execution technique for test inputs generation achieving high structural coverage of the program under test. The C++ program is compiled into the LLVM [3] bytecode and interpreted by KLOVER tool collecting statistics and sanity information. The experiments were made on 4 industrial programs up to 3k LOC and showed positive results regarding the manual

testing. Another tool named PAULS [4] is oriented on Java test case generation. It uses dynamic analysis of program execution to infer a call sequence model with static analysis of call relations based on argument dependence. The study is aimed at existing unit tests optimization in terms of code coverage, test case source code size and redundant cases search. It showed significant code coverage improvement on 6 open-source libraries, improving the existing unit test suites.

At the same time, alternatives suffer from invalid method call sequences and irrelevant input data generation, producing a high tests fault rate.

CIDER

The paper introduces a new approach of automatic testing scenarios generation named CIDER. Instead of earlier mentioned tools it's aimed at a script-based testing approach of C++ programs code base. The generated scripts can be used in component test suites for industrial projects. CIDER uses a test recording approach, meaning that output scenarios are first executed right from a target application that uses the library under test. The generated method calls sequences are relevant to the program execution and possibility of faulty call sequences without meaning is omitted. Then scripts are optimized to achieve higher code coverage and saved in the test suite.

In the next sections, we will overview a general script generation process, as well as valuable implementation details of CIDER tool. The experimental setup includes two C++ open-source libraries: *Hjson* [5] and *Pugixml* [6]. The following research questions will be answered:

RQ1: Are CIDER-recorded scripts executions comparable in terms of code coverage with the original test suites executions?

RQ2: Can generated scenarios be optimized in terms of code coverage?

Process overview

The formal CIDER usage process is shown in Fig. 1 and consists of:

1. Parsing target library *T* header files into an abstract syntax tree (AST) for detecting all functions and parameters with corresponding types.

2. Generation of C++ source wrapper files containing special hooks for function calls data collection.
3. Compile and build the T' library.
4. Using the AST generate the (*.swig) configuration files for SWIG [7] generator for script bindings generation.
5. Call SWIG generator to get SWIG C++ source files with lua scripting language bindings.
6. Compile and build the L library from sources generated on stage 6, which is used by lua interpreter I for the generated scripts execution.
7. Inject T' library into the target application and perform executable running in order to get session output data for script S generation.
8. Generate lua script S .
9. Execute S on lua interpreter I with imported library T and process output library coverage information.
10. Optimize script S using the harmony search metaheuristic algorithm.
11. Save the optimized version S' into the regression tests suite.

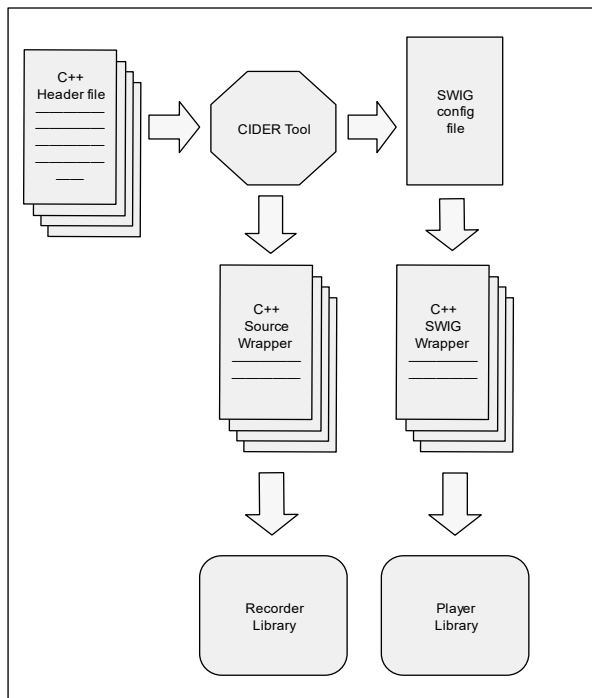


Fig. 1. Formal CIDER process overview

Data model

Every program execution is represented as a test scenario in our model. The test scenario consists of a sequence of method calls with corresponding arguments.

Each argument has one of the supported C++ types and value, recorded during an execution. The supported argument types by CIDER generally are:

- Strings (std::string, const char*, etc.).
- Integers (int, short, unsigned int, etc.).
- Booleans.
- Doubles (float, double).
- User Data (enums, classes, structs, etc.).

After scenario data is recorded it can be either mutated or generated into lua script [8]. Example of the recorded data chunks are shown in Fig. 2.

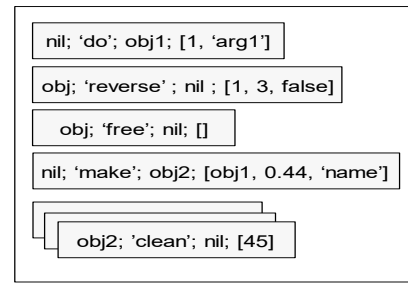


Fig. 2. Recorded program execution data example

Script optimization

An idea from a classic harmony search optimization algorithm (HS) was taken, which was first introduced by Z. Geem in 2001 [9]. The reason why it was chosen is that harmony search as a metaheuristic algorithm was compared to others and shown that it's more successful. Also, it's less sensitive to chosen parameters [10]. The task is formulated as finding the maximum value of the coverage function of the given script. The scenario S is represented as sequence of function calls, according to a formula:

$$S = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}, \quad n \in \mathbb{N}, \quad (1)$$

where n is the number of calls.

The F_j can be either a class method call or a free function call having m_j arguments count:

$$F_j = F(x_1, x_2, \dots, x_{m_j}), \quad m_j \in \mathbb{N}. \quad (2)$$

Then, the script S_i can be represented as a function that takes all the arguments from all its constituent functions.

$$S = S(x_1, x_2, \dots, x_l), \quad l = \sum_{j=1}^n m_j. \quad (3)$$

The objective function for HS algorithm can be represented as:

$$C(S) = C(x_1, x_2, \dots, x_l). \quad (4)$$

The number of the generated scenarios that can be kept in memory equal to k – *harmony memory size*. The *harmony memory* H_m consists of all generated scenarios' arguments and looks like this:

$$H_m = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1l} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{k1} & x_{k2} & \dots & x_{kl} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

where x_{i1} – arguments of script S_1 , $i \in [1 : l]$.

The harmony from the memory is used with θ probability - *memory consideration rate*. During a new harmony generation, each argument can be mutated with ζ *mutation rate*. The mutation formulas for each type of parameters are shown in Table 1.

Table 1 – Argument mutation formulas

| Argument type | Mutation formula |
|------------------------------|--|
| Integers, Floating points | $I'_i = \text{XOR}(I_i[k], U_{int}^{0,255}),$ $k = U_{int}^{0, \text{sizeof}(T)-1}$ |
| Booleans | $B'_i = U_{int}^{0,1}$ |
| Enums | $E_i = \{e_1, e_2, \dots, e_m\},$ $E'_i = E_i[l], \quad l = U_{int}^{0,m}$ |

The $I_i[k]$ represents a k -indexed byte from integer value, where k is taken from uniform int distribution in the range from 0 to size of T in bytes minus 1. For example, for the *char* type the indexed byte is always equal to 0. The formula was firstly introduced by M. Zalewski and is used in the libFuzzer implementation [11]. For the *boolean* values the mutated value is taken as uniform integer distribution in range from 0 to 1. For the *enum* values, all valid values are gathered into an array E_i , and then indexed via l , that is taken as uniform int distribution from 0 to the size of array E_i . For *integer* values, the mutation of parameters doesn't change the number of bytes, which represent the type of the argument. Also, *string* values aren't mutated as it can break the context and make it irrelevant. For example, string parameters can represent JSON-encoded data.

Experimental results

The experimental setup includes two C++ open-source libraries widely used in production codes all over the world. The subjects are represented in Table 2.

Table 2 – Experimental subjects

| Library | Hash | Sources (LoC) | Test Suites (LoC) |
|---------|---------|---------------|-------------------|
| Hjson | f18f03f | 3936 | 1970 |
| Pugixml | b2b4664 | 8943 | 8800 |

The library interfaces were parsed into the AST and source wrappers were generated and compiled into the original test suites. The test suites were run, and test scripts were generated. Example of the script is shown in Fig. 3.

```

1. object_1 = hjson.Value(hjson.UChar(248))
2. object_2 = hjson.Value(hjson.Char(100))
3. object_4 = hjson.plusOp(object_1, object_2)
4. hjson.equalEqualOp(object_4, hjson.Int(350))
5. object_4 = hjson.plusOp(object_2, object_1)
6. hjson.equalEqualOp(hjson.Int(334), object_4)
7. object_4 = hjson.plusOp(hjson.UChar(250), object_1)
8. hjson.equalEqualOp(object_4, hjson.Int(500))

```

Fig. 3. Generated script part example for Hjson library

Code coverage measurement of the original test suite TS_o and CIDER generated script S_c one is shown in Table 3. The values for generated script coverage and the original test suite differ. The reasons were investigated and was found out that it's due to fact that not all

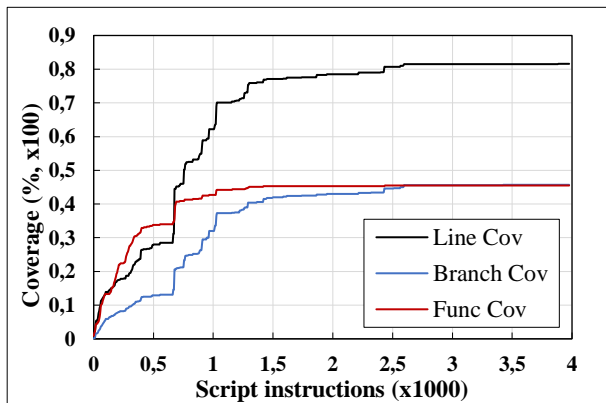


Fig. 4. Hjson coverage script instructions dependence

functions of C++ nature making sense in the context of lua. For example, move assignment operators and copy assignment operators are ambiguous from the lua side, as r-value references aren't supported by lua.

Table 3 - Comparison of code coverage results

| Library | Line Cov (%) | | Branch Cov (%) | | Function Cov (%) | |
|---------|--------------|-------|----------------|-------|------------------|-------|
| | TS_o | S_c | TS_o | S_c | TS_o | S_c |
| Hjson | 86,6 | 82,8 | 52,3 | 48,3 | 50,2 | 49,3 |
| Pugixml | 72,2 | 68,9 | 61,1 | 58,9 | 68,1 | 66,3 |

In addition, the execution time of TS_o and S_c were compared, results are shown in Table 4. The experiment was conducted using a MacBook Pro 2019 equipped with an Intel Core i7 processor (2.6 GHz, 6 cores), 16 GB of DDR4 RAM (2666 MHz), and a 512 GB SSD. The generated scripts were executed step-by-step, and the code coverage was measured. Results are shown in Fig. 4 and 5.

Table 4 – Comparison of average execution times

| Library | S_c instructions count | Avg. time (ms) | |
|---------|--------------------------|----------------|-------|
| | | TS_o | S_c |
| Hjson | 4178 | 635 | 649 |
| Pugixml | 17050 | 57 | 406 |

For both libraries there are continuous regions of instructions where the code coverage doesn't grow. Such regions contain similar script instructions with parameters that can be also optimized with *HS* algorithm to achieve the highest code coverage without generating new function calls.

Harmony search optimizations were performed on average with 5k iterations, and most effective parameters are $H_m=10$; $\theta = 0.5$; $\zeta = 0.2$. The stopping criteria was not finding any new solutions that can be saved into the memory over 300 iterations. Optimized and original script comparison are shown in Table 5, and in Fig. 6 and 7.

Table 5 – Comparison of code coverage results for optimized and initial scripts

| Library | Line Cov (%) | | Branch Cov (%) | | Function Cov (%) | |
|---------|--------------|---------|----------------|---------|------------------|---------|
| | S_c | S_c^o | S_c | S_c^o | S_c | S_c^o |
| Hjson | 82,8 | 83,4 | 48,3 | 49,3 | 49,3 | 50,8 |
| Pugixml | 68,9 | 73,2 | 58,9 | 62,8 | 66,3 | 67,1 |

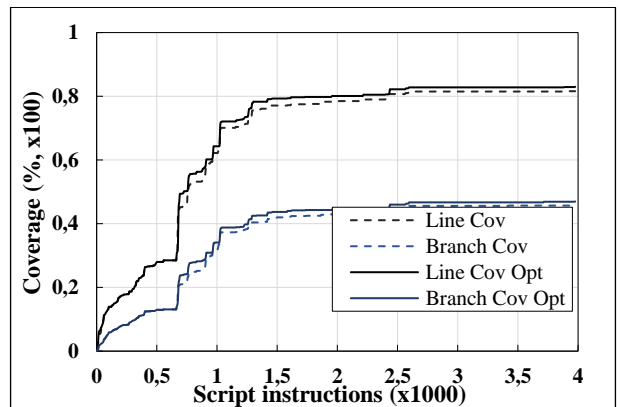


Fig. 6. Hjson optimized script vs original comparison

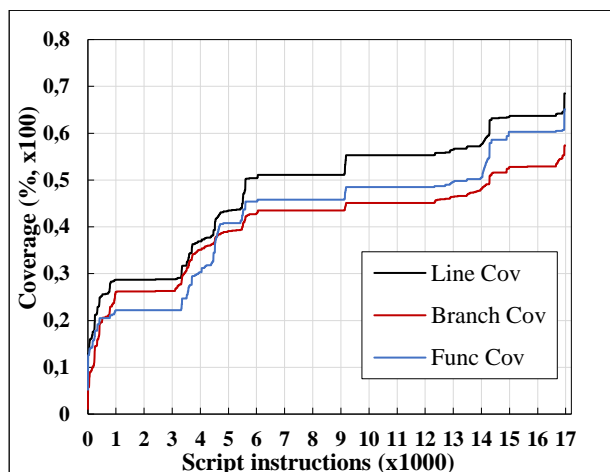


Fig. 5. Pugixml coverage script instructions dependence

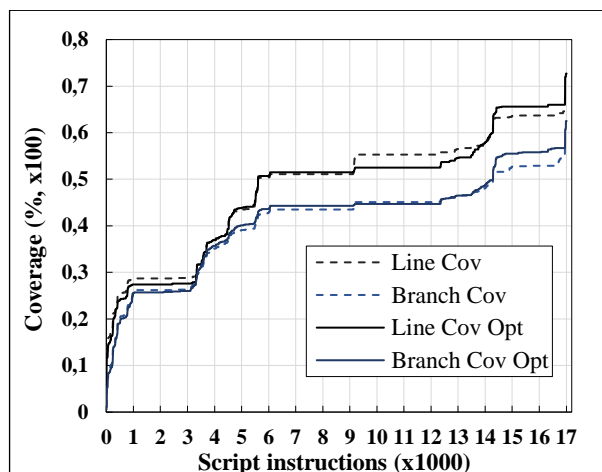


Fig. 7. Pugixml optimized script vs original comparison

Conclusion

A new tool for assisted test scenario generation has been presented. Experiments on third-party libraries have shown that the scenarios and original test suites have comparable code coverage and execution time. In addition, the generated scripts have been optimized using the harmony search algorithm. The result scenarios can be

used to improve existing regression testing test suites. Step-by-step coverage measurement has shown the regions of the original test suite that can be improved applying mutation of the parameters. For more covered Hjson the coverage improvement value is less than for the Pugixml library. The technique can be studied and improved further with legal method sequences generation, extending the search space for tests scenarios optimization.

REFERENCES

1. Yunho, K., Kim, M. and Kim, Y. (2022), "CITRUS: Automated Unit Testing Tool for Real-world C++ Programs", *2022 IEEE Conference on Software Testing, Verification and Validation (ICST)*, Valencia, Spain, pp. 400–410, doi: <https://doi.org/10.1109/ICST53961.2022.00046>
2. Li, G., Ghosh, I. and Rajan, S. P. (2011), "KLOVER: A Symbolic Execution and Automatic Test Generation Tool for C++ Programs", *Computer Aided Verification 23rd International Conference*, Springer, Berlin, Heidelberg, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-22110-1_49
3. (2024), *The LLVM compiler infrastructure*, available at: <http://www.llvm.org/>
4. Zhang, S., Saff, D., Bu, Y. and Ernst, M.D. (2011), "Combined Static and Dynamic Automated Test Generation", *ISSTA '11: Proc. of the 2011 Int. Symp. on Software Testing and Analysis*, N-Y, pp. 353–363, doi: <https://doi.org/10.1145/2001420.2001463>
5. (2024), *Hjson, a user interface for JSON*, available at: <https://hjson.github.io>
6. (2024), *Light-weight, simple and fast XML parser for C++ with XPath support*, available at: <https://pugixml.org/>
7. (2024), *Simplified Wrapper and Interface Generator*, available at: <https://www.swig.org>
8. (2024), *The Programming Language Lua*, available at: <https://www.lua.org>
9. Geem, Z., Kim, J. and Loganathan, G. (2001), "A new heuristic optimization algorithm: Harmony search", *Simulation*, vol. 76, no. 2, pp. 60–68, doi: <https://doi.org/10.1177/0037549701076002>
10. Yang, X.-S. (2009), "Harmony Search as a Metaheuristic Algorithm", *Music-Inspired Harmony Search Algorithm: Theory and Applications, Studies in Computational Intelligence*, vol. 191, Springer Berlin, Editor Z. W. Geem, 2009, pp. 1–14, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-00185-7_1
11. Zalewski, M. (2024), *American fuzzy lop (2.52b)*, available at: <https://lcamtuf.coredump.cx/afl>

Received (Надійшла) 27.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.04.2024

CIDER : Інструмент автоматизації тестування C++ бібліотек

М. В. Гулевич

Анотація. Програмне тестування є однією з найважливіших частин життєвого циклу розробки продукту. Компанії стикаються з значними ризиками, пов'язаними з відмовами програм, включаючи фінансові та репутаційні, тому цікавляться вкладенням часу та грошей у нові методи тестування та забезпечення якості. Програми, написані на C++, відомі своєю високою продуктивністю, але складні у зв'язку зі специфікою мови. У той же час автоматизовані інструменти, які доступні переважно для програм з графічним інтерфейсом користувача не є ефективними для тестуванням регресії вбудованих модулів. Таким чином, навіть часткова автоматизація таких процесів може мати позитивний вплив у відношенні оптимізації часу тестування регресії. У статті розглянута техніка тестування запису та відтворення виконання програми на рівні компонентів. Запропонований інструмент генерує сценарії тестування під час виконання програми, надаючи змогу виконувати ручне тестування та одночасно розширювати базу даних автоматизованого виконання компонентних тестів. Експерименти показали, що результати покриття коду таких сценаріїв є на високому рівні і мають тенденцію до покращення через алгоритмічну оптимізацію.

Ключові слова: автоматизація тестування, генерація скриптів, регресивне тестування, C++, оптимізація, гармонічний пошук, покриття коду.

Д. О. Дяченко, В. В. Кайда, А. О. Левченко, О. П. Міхаль

Харківський національний технічний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МЕТОДИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРИСТРОЇВ ІОТ З ВИКОРИСТАННЯМ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Анотація. Актуальність. Функціонування пристроїв Інтернету речей (ІоТ) з використанням методів машинного навчання (МН) відкриває безліч нових можливостей та переваг. Ці технології дозволяють розширити функціональні можливості традиційних пристроїв, надаючи їм здатність до самонавчання та адаптації до змінюваних умов середовища або поведінки користувачів. ІоТ пристрої збирають величезні обсяги даних з різних джерел, таких як датчики температури, вологості, руху тощо. МН дозволяє аналізувати ці дані, визначаючи закономірності та тенденції. Використовуючи історичні дані, алгоритми МН можуть передбачати майбутні стани системи або поведінку користувачів, дозволяючи оптимізувати роботу пристроїв. Застосування МН дозволяє ІоТ пристроям самостійно управляти своїми функціями, наприклад, регулювати освітлення або температуру в будинку, виходячи зі звичок користувачів. Алгоритми можуть аналізувати споживання електроенергії або води і оптимізувати їх використання, зменшуючи витрати та вплив на навколишнє середовище. МН також може допомогти виявити незвичну поведінку або спроби несанкціонованого доступу до системи, підвищуючи рівень безпеки. Здатність до анонімізації та захисту даних, що обробляються ІоТ пристроями, є критичною, особливо в контексті зростаючих занепокоєнь щодо приватності. Таким чином, використання МН в ІоТ розкриває потенціал для створення інноваційних рішень, які роблять наше життя зручнішим, безпечнішим та ефективнішим, що і робить тему досліджень в цій області актуальною. **Метою даної роботи** є аналіз методів функціонування пристроїв ІоТ. **Об'єктом дослідження** є методи збору, обробки та передачі даних в обчислювальних вузлах ІоТ. **Предметом дослідження** є керування обчислювальними вузлами ІоТ за допомогою машинного навчання. **Результати.** Проведено аналіз методів функціонування пристроїв ІоТ. Застосування методів зменшення затримки передачі сигналів вимагає врахування специфіки конкретної ІоТ системи, включаючи вимоги до затримки, типи даних, обчислювальні та мережеві ресурси, а також потреби користувачів або процесів, які вона обслуговує. При використанні методів зниження обсягу даних, що передаються, слід брати до уваги те, що вони вимагають ретельного планування та налаштування системи ІоТ, враховуючи специфіку застосування, типи даних та комунікаційні мережі. Це допоможе забезпечити оптимальне використання ресурсів, підвищення масштабованості та зниження вартості експлуатації ІоТ систем. Впровадження методів конфіденційності та безпеки даних вимагає комплексного підходу до безпеки на всіх етапах життєвого циклу ІоТ системи, від розробки та виробництва до експлуатації та зняття з експлуатації пристроїв. Основними викликами у зборі та аналізі даних в ІоТ є забезпечення безпеки та конфіденційності даних, обробка великих обсягів даних в реальному часі, а також потреба в ефективних методах МН, здатних адаптуватися до динамічних умов і змінних середовищ. Інтеграція передових технологій МН в ІоТ відкриває широкі можливості для створення більш інтелектуальних, ефективних та автономних систем, які можуть революціонізувати багато сфер життя, від розумних будинків до індустріального Інтернету речей.

Ключові слова: машинне навчання, обчислювальний вузол, ІоТ, датчик, протокол, FPGA.

Вступ

Збір даних є першим кроком, при якому ІоТ пристрої використовують вбудовані датчики або зовнішні інтерфейси для збору інформації про навколишнє середовище або про специфічні події [1]. Ці дані можуть включати різноманітні параметри, такі як температура, вологість, тиск, рівень освітленості, звук, вібрації, а також більш складні дані, такі як зображення або відео, зібрані з камер. Зібрані дані передаються до центральної системи або хмари для подальшого аналізу. Це може бути зроблено через різні бездротові або провідні комунікаційні технології, такі як Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, LTE, або через спеціалізовані ІоТ протоколи, наприклад, MQTT або CoAP. На цьому етапі використовуються алгоритми машинного навчання та аналітики даних для обробки та аналізу зібраних даних. Це дозволяє виявляти закономірності та тенденції в даних, робити прогнози на основі історичних даних, розпізнавати аномальні або небажані стани.

Для завдань обробки та класифікації даних можуть використовуватися методи машинного навчання, які обираються з оглядом на залежність від конкретних задач та доступних даних.

На основі аналізу та висновків, отриманих із даних, ІоТ пристрої можуть автоматично або за вказівкою користувача виконувати певні дії. Наприклад, регулювання температури в приміщенні, оповіщення про потенційні проблеми або автоматичне вимкнення пристроїв у разі виявлення аномалій.

Обробка даних безпосередньо в вузлах ІоТ стає все більш популярною, оскільки це дозволяє зменшити затримку в обробці даних, знизити обсяг передаваних даних і підвищити ефективність загальної роботи системи ІоТ. Цей підхід, відомий також як обчислення edge computing [2], передбачає виконання аналітичних алгоритмів та обробку даних безпосередньо на крайніх вузлах мережі, де збираються дані, замість того, щоб передавати їх до центральної оброблювальної системи або хмари. Обробка даних безпосередньо на пристрої дозволяє швидше реагувати на зміни в даних, що є критично важливим для додатків, чутливих до затримки, таких як системи автоматичного керування або безпеки. Відсіювання, агрегація та попередня обробка даних на крайніх вузлах знижують необхідність передавати великі обсяги даних через мережу, що може знизити витрати на передачу даних і навантаження на мережеву інфраструктуру. Обробка чутливих або особистих даних

безпосередньо на пристрої може допомогти забезпечити їхню конфіденційність, мінімізуючи ризики, пов'язані з передачею даних через вразливі мережі.

Для обробки даних на крайніх вузлах використовуються легковісні версії алгоритмів МН, оптимізовані для роботи на обмежених за ресурсами пристроях. Це можуть бути, наприклад, спрощені моделі нейронних мереж, алгоритми розпізнавання образів або часових рядів. Існує низка розробок і платформ, які полегшують розробку та розгортання додатків для обчислень на краю мережі, такі як AWS Greengrass, Azure IoT Edge та Google Cloud IoT Edge [3]. Обчислювальні можливості та обсяг пам'яті крайніх вузлів часто обмежені, що вимагає оптимізації алгоритмів та програмного забезпечення для ефективної роботи в таких умовах.

Управління розподіленими вузлами та їх масштабування можуть бути складними, особливо в великих масштабованих системах IoT. Розвиток технологій та інструментів для обчислень на краю мережі продовжує спрощувати інтеграцію і розширення можливостей IoT систем, дозволяючи створювати все більш інтелектуальні та автономні рішення.

Отже, **метою цієї роботи** є аналіз методів функціонування пристроїв IoT.

Основна частина

Зменшення затримки в системах IoT є критично важливим для багатьох застосунків, особливо тих, що вимагають швидкого реагування в реальному часі, таких як моніторинг критичних систем, автоматизоване виробництво та інтелектуальні транспортні системи. Переміщення обробки даних з центральних хмарних серверів на крайні вузли, ближче до джерела даних, дозволяє зменшити час передачі даних і затримку в обробці. Це допомагає забезпечити швидке реагування на події в реальному часі. Використання розподілених архітектур, де обробка даних відбувається на багатьох вузлах одночасно, допомагає зменшити затримку, розподіляючи навантаження і знижуючи час очікування обробки на одному сервері. Використання ефективних мережевих протоколів, оптимізованих для IoT, таких як Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) або Constrained Application Protocol (CoAP), які розроблені для забезпечення низької затримки і високої ефективності в мережах з обмеженими ресурсами [4]. Мінімізація обсягу обробки даних, необхідної для виконання конкретного завдання, шляхом використання більш ефективних алгоритмів і видалення зайвих обчислювальних процесів може значно знизити затримку. Встановлення пріоритетів для різних типів даних і трафіку може забезпечити, що критично важливі дані обробляються та передаються з найменшою затримкою. Агрегація та попередня обробка даних безпосередньо на IoT вузлах перед їхньою передачею може знизити обсяг переданих даних і, відповідно, зменшити затримку, пов'язану з їх передачею. Також можливе застосування спеціалізованого обладнання, такого як FPGA (польові програмовані вентильні матриці) або GPU (графічні процесорні одиниці), для прискорення обчислень може значно знизити

затримку обробки даних. FPGA можуть бути запрограмовані для виконання специфічних завдань обробки сигналів або даних, що робить їх ідеальними для застосувань, де потрібна висока швидкість обробки і мінімальна затримка в області IoT. FPGA можуть бути перепрограмовані на місці, щоб виконувати різні завдання або адаптуватися до змін у проектних вимогах. Завдяки паралельній обробці даних FPGA можуть обробляти великі обсяги даних з мінімальними затримками, що є критично важливим для деяких IoT-застосувань. FPGA можуть бути оптимізовані для мінімізації споживання енергії, що є важливим для пристроїв IoT, які часто працюють від батарей. Інтеграція FPGA та МН в IoT дозволяє створювати високоефективні, адаптивні та інтелектуальні системи. FPGA можуть бути використані для швидкої обробки даних від сенсорів IoT та виконання алгоритмів МН в реальному часі [5], тоді як МН може надати засоби для аналізу цих даних, прийняття рішень та прогнозування.

Ця інтеграція відкриває широкі можливості для розробки інноваційних IoT-рішень у таких галузях, як розумні будинки, промисловий інтернет речей (IIoT) [6], розумні міста, охорона здоров'я та багато інших.

Слід також відзначити адаптивне керування мережею, яке включає в себе автоматичне регулювання маршрутизації трафіку та керування пропускнуною спроможністю в залежності від поточного навантаження. Це може допомогти оптимізувати затримку в динамічно змінюваних мережевих умовах.

Зниження обсягу переданих даних у вузлах IoT є важливим аспектом оптимізації IoT систем, що дозволяє підвищити ефективність використання мережі, знизити витрати на передачу даних, зменшити енергоспоживання і покращити масштабованість системи. Перед тим як передавати дані на сервер або в хмару, можливо виконати попередню обробку даних безпосередньо на вузлі. Це включає агрегацію (наприклад, обчислення середніх значень з декількох вимірювань), фільтрацію неважливих даних, компресію та інші форми обробки для зменшення обсягу даних, які потрібно передати. Використання алгоритмів компресії даних дозволяє зменшити їх обсяг перед передачею. Існують різні техніки компресії, від простого кодування до більш складних алгоритмів, що призначені для конкретних типів даних (наприклад, зображень, аудіо або тексту). Замість постійної передачі всіх зібраних даних, вузли можуть передавати дані лише при виявленні значущих змін або подій. Це дозволяє знизити кількість переданих даних, відправляючи інформацію лише тоді, коли це дійсно необхідно.

Використання легковісних протоколів передачі даних, як-от MQTT або CoAP, які мають менший розмір заголовків порівняно з HTTP, може знизити загальний обсяг переданих даних. Передача лише змін у даних замість повного набору даних може значно знизити обсяг передачі. Це особливо ефективно для додатків, де дані змінюються повільно або де можливо передавати лише різницю від попереднього стану. Регулювання частоти, з якою вузли

відправляють дані, на основі поточних умов або важливості інформації, може допомогти знизити обсяг переданих даних. Наприклад, в періоди низької активності чи стабільності системи можна зменшити частоту відправлення.

Сучасні датчики та вузли часто оснащені вбудованими можливостями для попередньої обробки даних. Вибір таких інтелектуальних компонентів може допомогти мінімізувати обсяг переданих даних завдяки вищій ефективності локальної обробки.

Наступним питанням є підвищення конфіденційності та безпеки в вузлах IoT, що є одним з ключових аспектів при розробці та експлуатації IoT систем. Оскільки IoT пристрої часто збирають, обробляють та передають чутливі дані, важливо забезпечити їх належний захист. Можливе використання стандартів шифрування, таких як Transport Layer Security (TLS), для захисту даних під час їх передачі між IoT вузлами та серверами або хмарою або ж застосування сильного шифрування для зберігання даних на пристроях, щоб запобігти їх витоку у разі фізичного доступу до пристрою. Потрібно управління доступом за рахунок реалізації багатофакторної аутентифікації для доступу до системи управління IoT та/або використання сертифікатів та управління ключами для аутентифікації IoT вузлів і забезпечення взаємної аутентифікації між пристроями.

Ще одним фактором, який впливає на конфіденційність є мінімізація даних, тобто актуальними є збір та зберігання лише тих даних, які необхідні для роботи IoT системи, що допоможе зменшити ризики, пов'язані з їх можливим витоком та регулярне видалення зайвих або застарілих даних з пристроїв. Не буде зайвим і автоматичне або полегшене ручне оновлення програмного забезпечення та патчів безпеки для IoT пристроїв, що є критично важливим для захисту від відомих уразливостей. Використання безпечних механізмів оновлення, які перевіряють автентичність та цілісність оновлень перед їх встановленням.

Іншими факторами є захист вузлів IoT від несанкціонованого фізичного доступу, особливо в місцях з високим ризиком такого доступу; розробка та реалізація стратегій для виявлення безпекових інцидентів та аномалій у роботі IoT систем; розділення IoT пристроїв від інших частин мережі за допомогою віртуальних приватних мереж або мережевих вогнів для зниження ризику поширення вразливостей та Проведення регулярних безпекових аудитів та тестувань на проникнення для виявлення потенційних вразливостей у IoT системах.

Для більшості проаналізованих методів та факторів функціонування вузлів IoT можливе застосування МН. МН відіграє ключову роль у розвитку та функціонуванні вузлів IoT, надаючи пристроям здатність до самонавчання, адаптації та автономного прийняття рішень без безпосереднього людського втручання. Інтеграція МН дозволяє IoT системам бути більш інтелектуальними, ефективними та надійними. Воно також дозволяє вузлам IoT обробляти великі обсяги даних локально, визначаючи значущу інформацію або виявляючи аномалії без необхідності передачі всіх даних на центральний сервер або в

хмару. Це може значно зменшити затримку в обробці даних та енергоспоживання пристрою.

Алгоритми МН можуть аналізувати історичні дані та на основі них робити прогнози щодо майбутнього стану системи або поведінки користувачів. Це дозволяє IoT системам адаптуватися до змінних умов або потреб, наприклад, автоматично регулювати температуру у розумному будинку або оптимізувати енергоспоживання в індустріальних процесах.

Також МН може допомогти оптимізувати роботу IoT пристроїв, забезпечуючи максимальну ефективність при мінімальному споживанні енергії. Алгоритми можуть аналізувати режими роботи пристроїв та адаптувати їх для зменшення енергоспоживання, наприклад, шляхом управління режимами сну або активності.

Звичайно, що є і деякі обмеження, які пов'язані з використанням МН. Слід відзначити, що IoT вузли часто обмежені в обчислювальних потужностях та енергоспоживанні, що вимагає оптимізації алгоритмів машинного навчання для їх ефективної роботи. Ще одним недоліком є те, що впровадження МН в IoT вимагає додаткових заходів для забезпечення безпеки даних та приватності користувачів. Підтримка та оновлення моделей машинного навчання в розподілених IoT системах може бути складним завданням та вимагати нових підходів в області розробки.

Розгляд концепції IoT дозволяє зробити висновок, що пристрої IoT можуть виступати в ролі обчислювальних вузлів для розподіленої інформаційної системи. В даний час є тенденція на перенесення обробки даних з централізованих систем (хмарні обчислення) на рівень центру обробки даних (туманні обчислення) і далі рівень кінцевих пристроїв (граничні обчислення). Таким чином, з'являється можливість задіяти суттєві обчислювальні потужності, які раніше не використовувалися або використовувалися вкрай обмежено. Розподіл обчислень по безлічі обчислювальних вузлів дозволяє говорити про паралельні обчислення, які в ситуації використання незалежних обчислювальних пристроїв, які є розподіленими системами. Залежно від організації взаємозв'язку між обчислювальними вузлами також говорять про кластерні системи: використання IoT як розподіленої інформаційної системи дозволяє побудувати слабозв'язану кластерну систему [7–9].

Пристрої IoT мають свою специфіку та ряд обмежень, які для організації процесу вирішення обчислювальних завдань не дозволяють використовувати підходи, що використовуються у класичних паралельних та розподілених обчислювальних системах.

Висновки

У даній роботі проведено аналіз методів функціонування пристроїв IoT. Застосування методів зменшення затримки передачі сигналів вимагає врахування специфіки конкретної IoT системи, включаючи вимоги до затримки, типи даних, обчислювальні та мережеві ресурси, а також потреби користувачів або процесів, які вона обслуговує.

При використанні методів зниження обсягу даних, що передаються, слід брати до уваги те, що вони

вимагають ретельного планування та налаштування системи IoT, враховуючи специфіку застосування, типи даних та комунікаційні мережі. Це допоможе забезпечити оптимальне використання ресурсів, підвищення масштабованості та зниження вартості експлуатації IoT систем.

Впровадження методів конфіденційності та безпеки даних вимагає комплексного підходу до безпеки на всіх етапах життєвого циклу IoT системи, від розробки та виробництва до експлуатації та зняття з експлуатації пристроїв.

Таким чином, основними викликами у зборі та аналізі даних в IoT є забезпечення безпеки та конфіденційності даних, обробка великих обсягів даних в реальному часі, а також потреба в ефективних методах машинного навчання, здатних адаптуватися до динамічних умов і змінних середовищ. Інтеграція передових технологій машинного навчання в IoT відкриває широкі можливості для створення більш інтелектуальних, ефективних та автономних систем, які можуть революціонізувати багато сфер життя, від розумних домів до індустріального Інтернету речей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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>.
2. Anand B., Edwin A., Hao J. Gamelets – Multiplayer mobile games with distributed micro-clouds". Seventh International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU). 2014. pp. 14–20. doi:10.1109/ICMU.2014.6799051.
3. Verma A., Pedrosa L., Korupolu M., Oppenheimer D.; Tune E., Wilkes J. Large-scale cluster management at Google with Borg". Proceedings of the Tenth European Conference on Computer Systems. Article 18, sec. 2.1 (p. 1), sec. 6.1 (p. 11).2015. doi:10.1145/2741948.2741964
4. 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.
5. Xing Y. et al. MPTCP Meets Big Data: Customizing Transmission Strategy for Various Data Flows //IEEE Network. – 2020. – Т. 34. – №. 4. – С. 35-41.
6. Khan I., Chen K. EBA: Efficient Bandwidth Aggregation for Connected Vehicles with MPTCP //IEEE Internet of Things Journal. – 2021.
7. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
8. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускної здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
9. Palash M. R., Chen K., Khan I. Bandwidth-need driven energy efficiency improvement of MPTCP users in wireless networks //IEEE Transactions on Green Communications and Networking. – 2019. – Т. 3. – №. 2. – С. 343-355.

Received (Надійшла) 26.01.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.03.2024

Operation methods of IoT devices using machine learning

Dmytro Dyachenko, Valeriya Kaida, Anton Levchenko, Oleg Mikhail

Abstract. Relevance. The functioning of Internet of Things (IoT) devices using machine learning (ML) methods opens up many new opportunities and advantages. These technologies make it possible to expand the functionality of traditional devices, giving them the ability to self-learn and adapt to changing environmental conditions or user behavior. IoT devices collect huge amounts of data from various sources such as temperature, humidity, motion sensors, etc. MN allows you to analyze these data, identifying patterns and trends. Using historical data, machine learning algorithms can predict future system states or user behavior, allowing devices to be optimized. The application of MN allows IoT devices to independently manage their functions, for example, to regulate lighting or temperature in the house, based on your habits and preferences. Algorithms can analyze electricity or water consumption and optimize their use, reducing costs and impact on the environment. MH can also help detect unusual behavior or attempts to gain unauthorized access to the system, increasing security. The ability to anonymize and protect data processed by IoT devices is critical, especially in the context of growing privacy concerns. Thus, the use of MH in IoT reveals the potential for creating innovative solutions that make our lives more convenient, safer and more efficient, which makes the topic of research in this area relevant. **The purpose** is to analyze the methods of functioning of IoT devices. **The object** is methods of data collection, processing and transmission in IoT computing nodes. **The subject** is the control of IoT computing nodes using machine learning. **Results.** An analysis of the methods of functioning of IoT devices was carried out. Applying methods to reduce signal transmission delay requires consideration of the specifics of a particular IoT system, including latency requirements, data types, computing and network resources, and the needs of the users or processes it serves. When using methods to reduce the amount of data transmitted, it should be taken into account that they require careful planning and configuration of the IoT system, taking into account the specifics of the application, data types and communication networks. This will help ensure optimal use of resources, increase scalability and reduce the cost of operating IoT systems. The implementation of data privacy and security methods requires a comprehensive approach to security at all stages of the IoT system life cycle, from development and production to operation and decommissioning of devices. The main challenges in data collection and analysis in IoT are ensuring data security and privacy, processing large volumes of data in real time, as well as the need for effective machine learning methods that can adapt to dynamic conditions and changing environments. The integration of advanced machine learning technologies into the IoT opens up vast opportunities for creating more intelligent, efficient and autonomous systems that can revolutionize many areas of life, from smart homes to the industrial Internet of Things.

Keywords: machine learning, computing node, IoT, sensor, protocol, FPGA.

Н. С. Єрьоміна, Ю. М. Колтун, А. В. Беспалий, Ю. М. Шматько

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ СЕГМЕНТАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ В ІНТЕРЕСАХ НАВІГАЦІЇ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ

Анотація. На сьогоднішній день неможливо уявити сучасний світ без мобільних роботів (МР), які повинні своєчасно та оперативно виконувати покладені на них функції. На території України уже чимало років проводиться дослідження навігації МР з використанням кореляційно-екстремальних систем навігації (КЕСН). Можливі випадки в роботі КЕСН МР, коли необхідно терміново провести перепланування маршруту МР. Подібна ситуація може викликати проблему в рішенні задачі сегментації зображень, необхідних для високоточної навігації МР. Тому завдання розробки методів сегментації зображень є актуальним. Метою даної роботи є аналіз сучасних методів сегментації зображень та методів, які можуть бути використанні для навігації МР. Приведено аналіз існуючих методів сегментації зображень, таких як методи на основі порога, сегментація за регіонами, сегментація країв та сегментація на основі кластеризації, а також проаналізовано основні методи, які використовуються в КЕСН МР. Результати дослідження вказують на те, що до недоліків більшості наведених методів відносять високі вимоги до обчислювальних ресурсів та великий час на обробку зображень, тому існуючі методи сегментації зображень в інтересах навігації МР варто використовувати для підготовки еталонних зображень у випадках, коли немає жорстких часових обмежень. Як показав аналіз розроблені методи сегментації в інтересах МР не враховують особливості побудови та функціонування КЕСН МР, а також особливості опису об'єктів поверхні візування. У зв'язку з цим завдання розроблення нових методів сегментації зображень в інтересах навігації МР, оснащених КЕСН, є важливим і потребує в подальшому пошуку нових рішень.

Ключові слова: зображення, сегментація, метод, піксель, кореляційно-екстремальні системи навігації, мобільний робот, поверхня візування, поточне зображення, еталонне зображення, взаємно кореляційна функція, автокореляційна функція.

Вступ

На сьогоднішній день у зв'язку з широким застосуванням робототехніки, яка уже давно знайшла широке застосування у всіх сферах життя людини, великих успіхів досягнуто і в створенні мобільних роботів (МР). Як відомо МР може працювати як у автоматичному режимі (за заздалегідь заданим маршрутом) так і в дистанційному [1].

В системах навігації МР використовуються інерційні навігаційні системи (ІНС) [2], які доповнюються системами супутникової корекції [3, 4] або ж кореляційно-екстремальними системами навігації (КЕСН). Враховуючи той факт, що супутникові системи призводять до не автономності функціонування ІНС та у зв'язку з відсутністю в Україні власної навігаційної системи, то для керування МР в нашій державі більш доцільно використовувати КЕСН.

Кореляційно-екстремальні системи навігації – це системи, алгоритм роботи яких включає в себе обчислення функції взаємної або автокореляційної функції випадкових процесів, які характеризують стан керованого об'єкта, тобто МР, та визначення (пошук) координат головного екстремума даної функції [5].

Враховуючи те, що в процесі навігації МР може виникати невідповідність формування поточних зображень (ПЗ) до раніше підготовлених еталонних зображень (ЕЗ) виникає проблема порівняння ПЗ та ЕЗ. Це впливає на зниження якості оцінки стану контрольованих об'єктів.

Тому виникає необхідність зменшення факторів впливу, як на етапі формування сукупності ЕЗ так і при розробці алгоритмів формування вирівняної функції [6].

Це можливо шляхом визначення раціонального підходу до сегментації зображень, що будуть використані під час побудови ЕЗ та розробки алгоритму порівняння зображень.

Розробленню методів та алгоритмів сегментації зображень присвячена велика кількість публікацій, але вони не враховують особливості побудови та функціонування кореляційно-екстремальної системи навігації МР, а також особливості опису об'єктів поверхні візування (ПВ). Тому розробка нових методів сегментації зображень, сформованих для навігації МР являється важливим і потребує нових рішень.

Мета статті – проаналізувати сучасні методи сегментації зображень в цілому та методи, які можуть бути використанні для навігації МР.

Основний матеріал

1 Сегментація зображень є розширенням класифікації зображень, де крім класифікації виконується ще й локалізація. Таким чином, сегментація зображення являє собою надмножину класифікації зображень, при цьому модель точно визначає, де знаходиться відповідний об'єкт, окреслюючи його межі.

Під сегментацією розуміють процес поділу цифрового зображення на різноманітні підгрупи, які називають сегментами зображення. Метою сегментації є спрощення зображення, щоб полегшити його аналіз або ж передачу каналами зв'язку.

Завдання сегментації зображення здебільшого поділяють на три групи (види), в залежності від кількості та типу інформації:

- семантична сегментація;
- сегментація екземпляра;

- паноптична сегментація.

У той час як семантична сегментація визначає широку межу об'єктів, що належать до певного класу, сегментація екземпляра надає карту сегментів для кожного об'єкта, який він переглядає на зображенні, без будь-якого уявлення про клас, до якого належить даний об'єкт.

Моделі сегментації екземплярів класифікують пікселі за категоріями на основі «екземплярів», а не класів. Алгоритм сегментації екземплярів не знає, до якого класу належить класифікована область, але може розділити області об'єкта, що перекриваються або дуже схожі області об'єкта на основі їхніх меж.

Паноптична сегментація, безумовно, є найбільш інформативною, оскільки вона являє собою сполучення завдань екземплярної та семантичної сегментації. Паноптична сегментація дає карти сегментів усіх об'єктів будь-якого конкретного класу, присутніх на зображенні.

2 Аналіз існуючих методів сегментації зображень. До традиційних методів сегментації зображень відносять:

- методи на основі порога;
- сегментація за регіонами;
- сегментація країв;
- сегментація на основі кластеризації.

2.1 Метод на основі порога один із найпростіших методів сегментації зображення, за якого встановлюється порогове значення для поділу пікселів на два класи. Даний метод використовують з метою виокремлення об'єкта від фону. Пікселі, значення яких перевищують порогове значення, встановлюються рівними 1, а пікселі, значення яких менші за порогове значення, встановлюються рівними 0.

Математично це можна записати наступним чином:

$$S(i, j)^b = \begin{cases} 1, \text{ якщо } S(i, j) > 0 \\ 0, \text{ в інших випадках,} \end{cases} \quad (1)$$

де $S(i, j)$ – яскравість селективного зображення в точці (i, j) .

Таким чином, зображення перетворюється на двійкову карту, що призводить до процесу, який часто називають бінаризацією. Порогове значення зображення дуже корисне, якщо різниця в значеннях пікселів між двома цільовими класами дуже велика, і легко вибрати середнє значення як порога.

Порогове значення часто використовується для бінаризації зображення, щоб можна було використовувати додаткові алгоритми, такі як виявлення контуру та ідентифікація, які працюють тільки з бінарними зображеннями [2].

Методи на основі порогу в свою чергу розділяють на методи глобального та локального порога [7].

Методи на основі глобального порога розділяють зображення на дві області (об'єкт, фон). Для реалізації даних методів насамперед задають початковий поріг l^0 , який вираховується за допомогою

гістограми розподілу інтенсивності значень сірого кольору.

Для розрахунку порогового значення існує чимало методів. Найвідоміші з них це:

- ітеративний метод;
- метод Оцу.

Ітеративні методи ще називають методами послідовних наближень.

Ітеративні методи – це способи розв'язання задач, у яких вибираючи деякий початковий наближений розв'язок, обчислюють наступні, точніші наближення, при цьому використовуючи попередні значення.

Даний метод дає змогу ефективно боротися з крайовими ефектами і надмірним посиленням шумів під час відновлення обробки зображень. Ітеративний процес завжди можна зупинити, якщо шум на зображенні різко посилюється.

Метод Оцу (Otsu, 1979) [8] не підходить для багаторівневої сегментації зображень.

Тому було розроблено новий модифікований метод Оцу, заснований на оптимізації рою частинок (MoPSO), для вирішення проблеми багаторівневої сегментації зображень та для подолання проблеми багаторівневого порогового розбиття.

Основна мета запропонованого методу – це знаходження оптимальних порогів для сегментації зображень шляхом максимізації цільової функції Оцу за менший час обчислень.

Метод Оцу – це метод порогових значень, який використовує дисперсію для вимірювання рівномірності розподілу рівнів сірого на зображенні.

У своєму дослідженні Оцу (1979) визначив дисперсію між класами як суму функції кожного класу, яку можна обчислити за допомогою рівнянь:

$$g(t) = \delta_0 + \delta_1, \quad (2)$$

$$\delta_0 = w_0 + (\mu_0 - \mu_A)^2, \quad (3)$$

$$\delta_1 = w_1 + (\mu_1 - \mu_A)^2. \quad (4)$$

де δ_0 та δ_1 – дисперсія першого та другого класів відповідно;

μ – середня інтенсивність вихідного зображення (ВЗ).

При дворівневому пороговому розрізненні середній рівень кожного класу (μ_i) може бути обчисленим за допомогою рівнянь:

$$\mu_0 = \sum_{i=0}^{T-1} \frac{ip_i}{w_0}, \quad (5)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=T}^{L-1} \frac{ip_i}{w_1}. \quad (6)$$

Оптимальний поріг отримують з функції максимізації між дисперсіями класів, яку можна обчислити за допомогою рівняння:

$$T^* = \arg \max g(t). \quad (7)$$

Відповідно для багатопорогової задачі метод Оцу можна записати у наступному вигляді:

$$\begin{aligned}\delta_0 &= w_0 + (\mu_0 - \mu_A)^2; \\ \delta_1 &= w_1 + (\mu_1 - \mu_A)^2; \\ \delta_j &= w_j + (\mu_j - \mu_A)^2; \\ \delta_m &= w_m + (\mu_m - \mu_A)^2.\end{aligned}\quad (8)$$

Відповідно оптимальний багаторівневий поріг отримують шляхом максимізації функції між класами, яку можна отримати за допомогою такого рівняння:

$$T^* = \arg \max \left(\sum_{i=0}^n \delta_i \right). \quad (9)$$

Методів на основі локального порога досить багато, проте серед них виділяють наступні:

- метод Ніблека,
- метод Бернсена,
- метод Савуолі.

Найшвидшим із класичних методів на основі локального порога вважається метод Ніблека.

В локальній пороговій обробці, існують сильно зашумлені зображення, які неможливо обробити як зображення в сукупності. Відповідно, зображення розбивають на підобласті.

Однак у локальній пороговій обробці рішення про приналежність пікселя до будь-якого з класів приймається на аналізі даних про просторове положення цього пікселя та безпосередньо неважливо, які по сусідству з ним пікселі знаходяться, і якою характеристикою вони володіють.

Метод Бернсена [9] базується на ідеї зіставлення рівнів яскравості пікселя, що перетворюється, зі значеннями локальних середніх, обчислених у його оточенні.

Пікселі обробляються по черзі шляхом порівняння їхньої інтенсивності із середніми значеннями яскравості.

Алгоритм, який використовується в даному методі, дає змогу виконати сегментацію для зображень, що містять шум, що залежать від чутливого сигналу, зображень, які мають складну структуру фону або ж малий контраст, і при цьому практично без втрат корисної інформації.

2.2 Сегментація за регіонами. Алгоритми сегментації на основі областей (регіонів) працюють, шукаючи схожість між сусідніми пікселями і групує їх у спільний клас.

Прикладом подібного алгоритму є популярний алгоритм вододілу для сегментації, який працює, починаючи з локальних максимумів карти евклідових відстаней і зростає за умови, що жодні два початкових числа не можуть бути класифіковані як такі, що належать до однієї й тієї самої області або карти сегмента [10].

2.3 Сегментація країв, також звана виявленням країв, являє собою завдання виявлення країв на зображеннях.

З погляду сегментації можна сказати, що виявлення країв відповідає класифікації пікселів зображення, які є крайовими пікселями, і відповідно виділенню цих крайових пікселів в окремий клас.

Виявлення країв зазвичай виконується за допомогою спеціальних фільтрів, які дають краї зображення після згортки. Ці фільтри розраховуються за допомогою спеціальних алгоритмів, які оцінюють градієнти зображення в координатах x і y просторової площини.

2.4 Сегментація на основі кластеризації. Кластеризація K -середніх, зокрема, враховує всі пікселі та групує їх у k класів. На відміну від методів нарощування регіонів, методи на основі кластеризації не потребують вихідної точки для початку сегментації [11].

Даний метод застосовується наступним чином: як об'єкти можуть виступати пікселі зображення, а як характеристики – колір даних об'єктів.

Ітераційний алгоритм K -середніх полягає в наступному:

1. Вибирається кількість кластерів k .
2. Випадковим чином із заданого зображення вибирається k точок, так звані «центри» кластерів. Кожному кластеру відповідає один центр.
3. Усі точки зображення розподіляються по кластерах. Обчислюється відстань від точки до кожного центру кластера, і точку відносять до того кластера, відстань до центру якого буде найменшою.
4. Коли всі точки зображення розподілені по кластерах, відбувається перерахунок центрів кластерів.

Метод кластеризації даних k -середніх є ефективним і швидким методом. Однак він має свої недоліки. Одним із недоліків методу k -середніх є необхідність задавати кількість кластерів. Проте головним недоліком цього методу є вибір центрів кластерів випадковим чином. Оскільки центри кластерів обирають випадковим чином, то результати роботи програми, запущеної декілька раз для одного й того самого зображення, відрізнятимуться.

3 Аналіз існуючих методів КЕСН мобільних робіт. Методи і алгоритми сегментації можна розглядати як формалізацію поняття відокремлення об'єкта з фону.

3.1 Метод ітераційного формування селективних ЕЗ. Кореляційний аналіз зображення можна здійснювати методом «ковзного вікна». Його суть полягає в загальному аналізі пікселів зображення, які «покриваються» деякою двовимірною областю, кінцевого розміру. Усі пікселі зображення обробляються за певним правилом. Результатом обробки може бути яскравість пікселя вихідного зображення (ВЗ).

Процес обробки продовжується до тих пір поки вікно буде зміщено на всі можливі значення пікселів в межах зображення. Якщо при використанні даного методу по чергово використовувати фрагменти ВЗ, то результатом буде набір значень взаємно кореляційних функцій (ВКФ) фрагментів зображення та цілого зображення.

Кореляційний аналіз дає змогу визначити внесок фрагментів зображення в автокореляційну функцію (АКФ) зображення, що являється необхідним для отримання селективного ЕЗ.

Отримані таким чином селективні зображення зберігають кореляційний зв'язок із вихідним зображенням.

Необхідною частиною методу формування ЕЗ повинна бути перевірка якості отриманих селективних зображень шляхом побудови та порівняння автокореляційних функцій ВЗ і ВКФ вихідного і селективних зображень.

Для кількісного порівняння побудованих автокореляційних функцій (ВКФ) варто використати кількісний показник, який в подальшому використовується як показник якості селективного зображення.

Селективне зображення, яке характеризується найкращим значенням такого показника і буде ЕЗ.

Отже, метод ітераційного формування селективних ЕЗ для КЕСН може застосовуватися в системах КЕСН з датчиками зовнішньої інформації, що формують зображення у видимому оптичному, інфрачервоному та радіолокаційному діапазоні.

До недоліків даного методу відносять високі вимоги до обчислювальних ресурсів. Час підготовки ЕЗ може займати кілька годин.

Таким чином, цей підхід доцільно використовувати для підготовки еталонних зображень у яких випадках, коли немає жорстких часових обмежень [12].

3.2 Методи формування ЕЗ КЕСН з використанням кореляційного аналізу зображень за яскравістю та контрастністю.

Суть методу з використанням кореляційного аналізу зображень по яскравості застосовується для виявлення ділянок або об'єктів на ВЗ з максимальною яскравістю.

Формування ЕЗ для КЕСН МР в умовах обмеженого числа об'єктів на ПВ здійснюється за результатами кореляційного порівняння ВЗ з сукупністю селективних зображень.

Кореляційне порівняння запропоновано здійснювати за яскравісним параметром, який вимірюється датчиком первинної обробки (ПО) системи, відповідно до якого здійснюється формування селективних зображень відповідних ділянок місцевості.

Відповідно, згідно проведених досліджень [12] можна зробити висновок, що селективні зображення, які отримуються шляхом виділення максимально яскравих ділянок ВЗ, дозволяють зберігати кореляційний зв'язок з ВЗ.

Відповідно отримані селективні зображення даним методом дозволяють формувати ЕЗ для фун-

кціонування кореляційно-екстремальних систем навігації мобільних роботів.

Метод з використанням кореляційного аналізу зображень за контрастністю полягає у виділенні контрастних меж об'єктів на зображенні.

Контрастність границь об'єктів на зображенні являється більш стабільною ніж яскравість, так як яскравість більш сильно залежить, від освітленості об'єктів.

Даний метод має ті ж самі недоліки, так само як і попередній, в тому числі високі вимоги обчислювальних ресурсів.

Висновок

Надійність алгоритмів та сегментація зображень залежить від того, наскільки точно і повно при цьому врахована додаткова інформація, яка має включати в себе наступні відомості [13-18]:

- число об'єктів S ;
- характеристики розподілу яскравості в областях об'єктів або фону (екстремальні значення яскравості, кількість перепадів яскравості);
- оцінки яскравості перепаду при переході з області фону в область об'єктів;
- форма об'єкта;
- інформація про те, яку частину поля зору займає об'єднання областей об'єктів.

Спотворення інформації сильно впливає на формування ПЗ, що в свою чергу може призвести до невідповідності ПЗ еталонному зображенню, яке сформовано раніше.

Така невідповідність призводить до зниження якості оцінки стану об'єктів [19-21]. Відповідно, викликає необхідність усунення можливої невідповідності, що ускладнює процедуру формування результату порівняння зображень та впливає на зниження точності показників КЕСН.

Тому варто ще на етапі формування сукупності ЕЗ та розроблення алгоритмів формування розв'язувальної функції зменшувати чинники впливу [16].

Це можливо шляхом визначення раціонального підходу до сегментації зображень з урахуванням необхідних інваріантів, що будуть використані під час побудови ЕЗ та розробки алгоритму порівняння зображень.

Розробленню методів та алгоритмів сегментації зображень присвячено дуже значну кількість публікацій.

Однак, як показав аналіз, вони не враховують особливості побудови та функціонування КЕСН МР, а також особливості опису об'єктів ПВ.

У зв'язку з цим завдання розроблення методу сегментації зображень в інтересах навігації МР, оснащених КЕСН, є важливим і потребує пошуку нових рішень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Особливості застосування безпілотних літальних апаратів органами та підрозділами поліції: метод. рек. / А. А. Саковський, С. М. Науменко, С. І. Кравченко, І. М. Єфіменко та ін. Київ: Нац. акад. внутр. справ. 2022. 72 с.
2. Методи фільтрації сигналів у кореляційно-екстремальних системах навігації // В.К. Баклицкий, А.М. Бочкарев, М.П. Мусьяков. – М.: Сов. Радио. – 1986. – 216 с.
3. Кузовков Н. Т., Саличев О. С. Інерціальна навігація і оптимальна фільтрація. М.: Машинобудування, 1982.

4. Petrovska, I. and Kuchuk, H. (2023), "Adaptive resource allocation method for data processing and security in cloud environment", *Advanced Information Systems*, Vol. 7(3), pp. 67–73, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.10>
5. Білоглазов І. М., Тарасенко В.П. Кореляційно-екстремальні системи. М.: Сов. радио, 1974.
6. Sotnikov O., Petrov K., Udovenko S., Gnusov Yu., Radchenko V., Kaliakin S., Gromliuk K., Kyrychenko O. The Use of Coplanar Transmission Lines for Protecting Receiving Antenna Systems from Powerful. *Problemele energeticii regionale*. 2023. –1 (57), pp. 134-146. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.1-57.11>
7. Yuheng S., Hao Y. Image Segmentation Algorithms Overview. 2017. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1707/1707.02051.pdf>
8. Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS*, SMC-9(1), 62–66.
9. Bernsen J. Dynamic thresholding of grey-level images. *Proc. Eighth Int'l Conf Pattern Recognition*. 1986. P. 1251-1255.
10. Kovalenko, A. and Kuchuk, H. (2022), "Methods to Manage Data in Self-healing Systems", *Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 425, pp. 113–171, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96546-4_3
11. URL <https://towardsdatascience.com/understanding-k-means-clustering-in-machinelearning-6a6e67336aa1>
12. N. Yeromina, V. Samoilenko, D. Chukanivskyi, O. Zadkova, O. Brodova, O. Levchenko. The Method of Iterative Formation of Selective Reference Images, *IJETER*, 8 (7), 2020, pp. 3753-3759, doi:10.30534/ijeter/2020/138872020.
13. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускної здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
14. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
15. Кучук Г.А. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, Н.В. Лукова-Чуйко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава . ПНТУ, 2017. – Вип. 2(42). – С. 117-120.
16. Худов В.Г. Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптикоелектронного спостереження / В.Г. Худов, Г.А. Кучук, О.М. Маковейчук, А.В. Крижний // Системи обробки інформації, 2016. – Вип. 9 (146). – С. 77-80.
17. Ruban, I.V., Martovytskyi, V.O., Kovalenko, A.A. and Lukova-Chuiko, N.V. (2019), "Identification in Informative Systems on the Basis of Users' Behaviour", *Proceedings of the International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2019-September*,9019446, pp. 574-577,
18. Sotnikov O., Kartashov V., Tymochko O., Sergiyenko O., Tyrsa V., Mercorelli P., Flores-Fuentes W. Methods for ensuring the accuracy of radiometric and optoelectronic navigation systems of flying robots in a developed infrastructure (eds) *Machine Vision and Navigation*. Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-030-22587-2_16.
19. Sotnikov O., Tymochko O., Bondarchuk S., Dzhuma L., Rudenko V., Mandryk Ya., Surkov K.2, Palonyi A., Olizarenko S. Generating a Set of Reference Images for Reliable Condition Monitoring of Critical Infrastructure using Mobile Robots. *Problemele energeticii regionale*. 2023. –2 (58), pp. 41-51. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.2-58.04>
20. S. Trehubenko, L. Berkman, N. Yeromina, S. Petrov, Y. Bryzhatyi, H. Kovalov, V. Dachkovskyi, L. Mikhailova. The Operation of Detection Systems in Conditions of Contrast Decrease of Ground Objects, *IJETER*, 8 (1), 2020, pp. 208-212, doi:10.30534/ijeter/2020/28812020.
21. Sotnikov O., Petrov K., Udovenko S., Gnusov Yu., Radchenko V., Kaliakin S., Gromliuk K., Kyrychenko O. The Use of Coplanar Transmission Lines for Protecting Receiving Antenna Systems from Powerful. *Problemele energeticii regionale*. 2023. –1 (57), pp. 134-146. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.1-57.11>

Received (Надійшла) 13.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.04.2024

Analysis of modern image segmentation or mobile robot navigation

N. Yeromina, Yu. Koltun, A. Bespalyi, Yu. Shmatko

Abstract. Today, it is impossible to imagine the modern world without mobile robots (MR), which must perform their functions in a timely and efficient manner. In Ukraine, for many years, the study of MR navigation using correlation-extreme navigation systems (CENS) has been carried out. There may be cases in the operation of the MR CENS when it is necessary to urgently re-plan the MR route. Such a situation can cause a problem in solving the problem of image segmentation required for high-precision MR navigation. Therefore, the task of developing methods for image segmentation is relevant. The aim of this paper is to analyse the current methods of image segmentation and methods that can be used for MR navigation. The analysis of existing image segmentation methods, such as threshold-based methods, segmentation by regions, edge segmentation, and clustering-based segmentation, is presented, and the main methods used in the CENS of MR are analysed. The results of the study indicate that the disadvantages of most of the above methods include high requirements for computing resources and long image processing time, so the existing methods of image segmentation for the purposes of MR navigation should be used to prepare reference images in cases where there are no strict time constraints. As the analysis has shown, the developed methods of segmentation for the benefit of MR do not take into account the peculiarities of the construction and operation of CENS MR, as well as the peculiarities of describing the objects of the imaging surface. In this regard, the task of developing new methods of image segmentation for the purposes of navigation of MR equipped with CENS is important and requires further search for new solutions.

Keywords: image, segmentation, method, pixel, correlation-extreme navigation systems, mobile robot, viewing surface, current image, reference image, mutual correlation function, autocorrelation function.

D. Zhovtonizhko, V. Zubenko, O. Mozhaev, A. Huk

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

STUDY OF LOCAL IMAGE FEATURES DETECTORS

Abstract. The article is devoted to the optimization of local image feature detectors. They can be used in mobile augmented reality video information systems. A study was conducted of the effectiveness of using a brightness preliminary detector in conjunction with a Harris angle detector. The simulation results showed a reduction in the duration of detection of local features of the test image (on average 220 times), a reduction in the number of identified image features and a slight change in the threshold value of the angle response.

Keywords: video information system of augmented reality, brightness preliminary detector of special points, local feature of the image, special point of the image.

Introduction

Video information systems supplemented reality (VIS DR) are classified according to the method of obtaining information about the real world. There are marker, markerless systems, as well as systems based on spatial tracking.

Markerless augmented reality systems, as well as systems based on spatial tracking, use two main approaches to determining the position of the observing camera in space. This is method for identifying local features of an image and texture comparison method.

Main part

In augmented reality video information systems using the principle of spatial tracking, the main task is to continuously determine the change in the position of the observing camera in space [1]. To solve this problem, the algorithm shown in Fig. 1 is used.

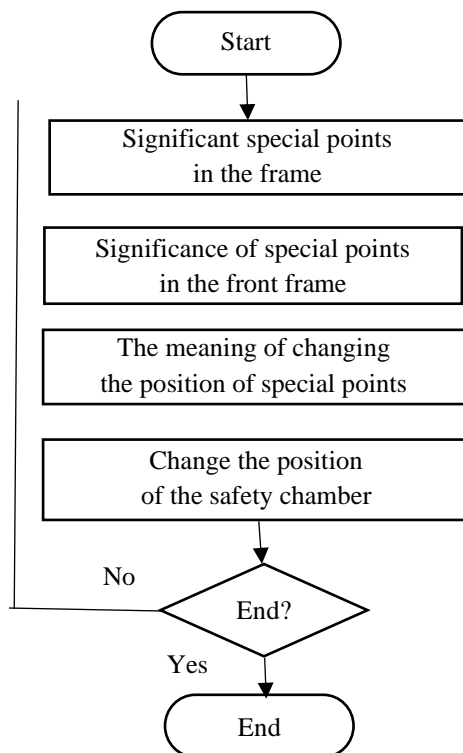


Fig. 1. Block diagram of the main algorithm of VIS DR using spatial tracking technology

In each new frame, local features of the image are determined, which are compared with the features found in the previous frame. Next, the change in the position of the associated special points is determined and, based on this information, the change in the position of the observing camera in space is calculated. To identify special points from the video stream coming from the camera, special algorithms are used - local image feature detectors, which are usually classified according to the type of special points identified. The two most common types of singular points are corners and circles (blobs).

An angle is a special point that is formed from two or more edges; the edges usually define the boundary between different objects or parts of the same object [2]. The main property of angles is that in the vicinity of an angle, two directions dominate the image gradient, which makes them distinguishable. Gradient is a vector quantity showing the direction of the fastest increase in the image intensity function $I(x,y)$. Depending on the number of intersecting faces, there are different types of angles, shown in Fig. 2: L, Y (or T), and X-connected (some also distinguish arrow-shaped connected angles) [2, 3].



Fig. 2. Different types of angles

In mobile video information systems of augmented reality, the most widely used are corner detectors, which have higher efficiency in contrast to blob detectors. Along with efficiency, an important characteristic of a detector is speed. Since augmented reality video information systems are real-time systems, for acceptable quality of the output video stream it is necessary that the frame rate does not fall below a threshold of 25 frames per second, which determines the upper limit of the processing time of one frame of the video stream, namely 40 ms [3]. To increase the speed of corner detectors, it is proposed to use a brightness preliminary detector of special points.

The principle of its operation is to select potential special points from the image and transfer them to the detector for further analysis. Thus, to highlight features, not the entire frame will be analyzed, but only those areas where they can be found. The block diagram of the preliminary detector operation algorithm is shown in Fig. 3.

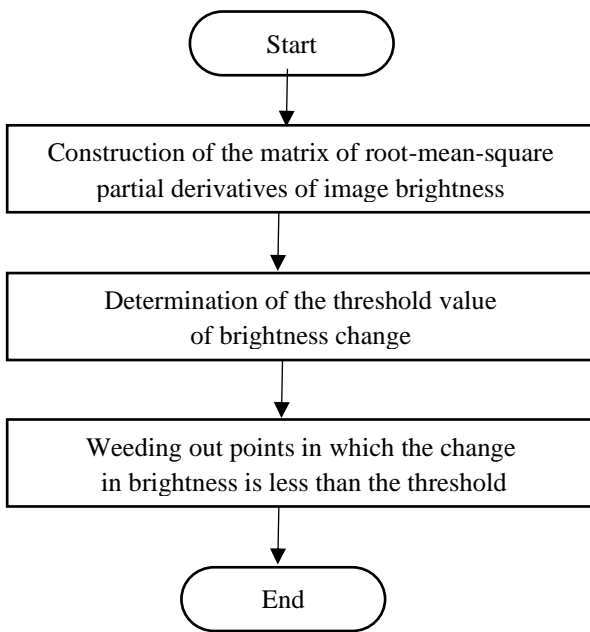


Fig. 3. Block diagram of the main algorithm of the brightness preliminary detector of special points

To determine brightness differences, a matrix of the root-mean-square sum of partial derivatives of brightness in a pixel is constructed

$$S_{x,y} = \sqrt{\left(\frac{dI}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dI}{dy}\right)^2}, \quad (1)$$

where S is the matrix of root-mean-square sums of partial derivatives of image brightness.

After constructing the matrix, the maximum and minimum values of its elements are determined and, on their basis, the threshold value for brightness changes is calculated

$$d = S_{min} + \left(\frac{S_{max} - S_{min}}{k}\right), \quad (2)$$

where k is an empirical constant, the value of which is usually chosen in the range [1.4 ... 2]; S_{min}, S_{max} are the minimum and maximum values of the matrix element S , respectively.

Potential singular point $I(x,y)$ such a point of the image I with coordinates x,y is considered for which the following condition is satisfied:

$$S_{x,y} \geq d. \quad (3)$$

Selected potential singular points are transferred for analysis to an image feature detector [4]. Quite a lot of different angle detectors are described in the literature: Moravec detectors, Sh-Tomasi detectors, Harris detector, etc. One of the main disadvantages of many algorithms is their high computational complexity with not the highest accuracy. The most accurate results of detecting singular points are shown by the Harris detector; it is also the most commonly used detector of local image features in real-time systems, so a study was conducted on the use of a preliminary detector in conjunction with the Harris detector. To highlight local features in an image, the

Harris detector analyzes each pixel in the image, as well as the pixels in its vicinity. Thus, to identify local features of an image with a size of N pixels in height and M pixels in width (with a neighborhood size of $P \times Q$ pixels) using the Harris detector, $M \times N \times P \times Q$ iterations of the algorithm will be required. In the proposed luminance pre-detector, each pixel is analyzed once, so pre-extracting feature points requires $M \times N$ iterations of the algorithm. Thus, the use of a brightness preliminary detector makes it possible, with insignificant computational costs, to determine potential special points of the image, which will subsequently be processed by corner detectors that require significant computational costs.

The following metrics are proposed to evaluate the effectiveness of using a pre-detector.

1. Changing the duration of frame processing when using a preliminary detector.
2. Changing the number of found special points in the image.
3. Changing the threshold value of the angle response for a set of points found by the Harris detector both without using a preliminary detector of singular points, and with its use.

The angle response measure is a dimensionless quantity that evaluates the degree of similarity of the neighborhood of a point to an angle [5]. The emulation computing experiment described below was carried out on a computer with a dual-core AMD Athlon II P360 processor with a clock frequency of 2.3 GHz. To determine changes in the duration of frame processing using a preliminary detector, a test application was implemented that measured the duration of frame processing. For each of the presented resolutions of the test image shown in Fig. 4, 1000 measurements of the processing duration were carried out, after which, based on the obtained data, the mathematical expectation of the duration of frame processing was calculated, presented in Table 1 [4, 6].



Fig. 4. Test image

Based on the data from Table 1, a graph was constructed of the dependence of the duration of image processing on the number of image points, shown in Figure 5. The resulting dependence of the duration of highlighting special points on the number of pixels for the selected computer is linear and is approximately described by the formula $t(N) = 9 \times 10^{-5} N$, where N is the number of pixels.

Table 1 – Test image processing time

| Test image resolution, pixels | 320x240 | 640x480 | 768x576 | 800x600 | 1024x768 |
|--|---------|---------|---------|---------|----------|
| Mathematical expectation of processing duration without a preliminary detector, ms | 1386 | 5681 | 7839 | 8439 | 14006 |
| Dispersion of processing duration without preliminary detector, ms | 102 | 418 | 520 | 589 | 827 |
| Mathematical expectation of processing duration with preliminary detector, ms | 6 | 24 | 35 | 36 | 70 |
| Dispersion of processing duration with preliminary detector, ms | 3 | 4 | 5 | 6 | 13 |

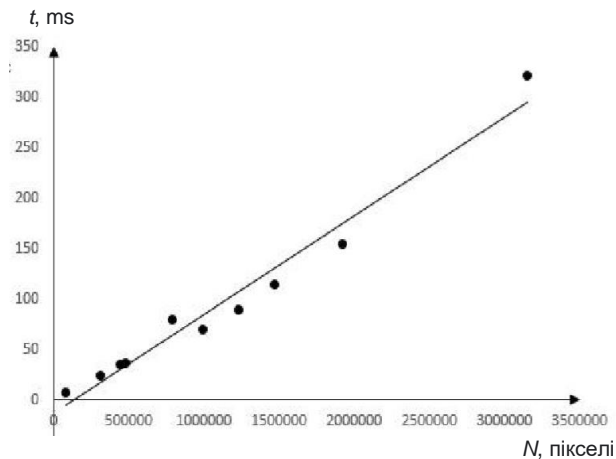


Fig. 5. Dependence of the duration of image processing on the number of points

As follows from Table 1, when detecting local features of a test image with a Harris detector, the use of a brightness preliminary detector made it possible to reduce the detection duration by approximately 220 times. The use of a preliminary detector significantly affects the number of found special points. The Harris

detector identifies special points based on the angle response values. The pre-detector uses changes in image brightness.

They are characteristic not only of corners, but also of straight lines, as well as prominent points [7].

Conclusions

During the modeling process, data were obtained indicating that the use of a brightness preliminary detector of local image features significantly reduces the time for identifying local image features. This allows the use of angle detectors in augmented reality video information systems operating in real time. At the same time, when using a preliminary detector, the number of identified local features is significantly reduced. To increase the number of distinguished features, it is possible to use various noise filters at the preliminary detection stage, as well as reduce the threshold brightness value in the preliminary detector using numerical methods. The decrease in the angle response measure in the selected local features is explained by the fact that some local features do not fall into the set of points identified by the preliminary detector, which leads to a change in the threshold value of the angle response.

REFERENCES

1. Tola E. DAISY: an efficient dense descriptor applied to wide baseline stereo / E. Tola, V. Lepetit, P. Fua // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2010. – No. 5(32). – pp. 815-830.
2. Xia G. Accurate Junction Detection and Characterization in Natural Images / G. Xia, J. Delon, Y. Gousseau // International Journal of Computer Vision. – 2014. – No. 1(106). – pp. 31-56.
3. Ткачов В. М., Коваленко А. А., Кучук Г. А., Ні Я. С. Метод забезпечення живучості високомобільної комп'ютерної мережі. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Том 5, № 2. С. 159-165. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.22>
4. Худов В.Г., Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптикоелектронного спостереження / В.Г. Худов, Г.А. Кучук, О.М. Маковейчук, А.В. Крижний // Системи обробки інформації, 2016. – Вип. 9 (146). – С. 77-80.
5. Petrovska I., Kuchuk H. Static allocation method in a cloud environment with a service model IAAS. *Сучасні інформаційні системи*. 2022. Том 6, № 3. С. 99-106. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.3.13>
6. Dotsenko, N., Chumachenko, I., Galkin, A., Kuchuk, H. and Chumachenko, D. (2023), "Modeling the Transformation of Configuration Management Processes in a Multi-Project Environment", *Sustainability (Switzerland)*, Vol. 15(19), 14308, doi: <https://doi.org/10.3390/su151914308>
7. Mann S. Wearable Computing, 3D Augmented Reality, Photographic/ Videographic Gesture Sensing and Veillance / S. Mann, S. Feiner, S. Harner, M.A. Ali, R. Jazner, J. Hansen, S. Baldassy // Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction. – 2015. – pp. 497-500.

Received (Надійшла) 06.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.04.2024

Дослідження детекторів локальних особливостей зображення

Д. С. Жовтоніжко, В. П. Зубенко, О.О. Можасв, А. С. Гук

Анотація. Стаття присвячена оптимізації детекторів локальних особливостей зображення. Вони можуть застосовуватись у мобільних відеоінформаційних системах доповненої реальності. Проведено дослідження ефективності застосування попереднього яскравого детектора спільно з детектором кутів Харріса. Результати моделювання показували скорочення тривалості детектування локальних особливостей тестового зображення (в середньому – у 220 разів), скорочення кількості особливостей зображення, що виділяються, і незначна зміна порогового значення відгуку кута

Ключові слова: відеоінформаційна система доповненої реальності, попередній яскравий детектор особливих точок, локальна особливість зображення, особлива точка зображення.

О. Ю. Заковоротний, А. В. Хулап

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЧИСЛЕННЯ НЕЙРОМЕРЕЖ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИКОРИСТАННЯ ЦІЛОЧИСЕЛЬНОЇ АРИФМЕТИКИ

Анотація. Більшість пристроїв-датчиків в системах інтернету речей базуються на енергоефективних мікроконтролерах, обчислювальні ресурси яких обмежені, як і обсяги наявної пам'яті. Підвищення захищеності використання таких пристроїв за допомогою нейромереж є важливою та актуальною проблемою. В статті описана можливість використання штучних нейронних мереж у малих мікроконтролерах з обмеженими ресурсами. **Мета** даної роботи полягає у перевірці можливості обчислення нейромереж на базі цілочисельної арифметики задля зменшення часу обчислення нейромережі та виключення операцій по нормалізації даних, а також оцінка доцільності використання таких нейромереж у сфері безпеки інтернету речей у порівнянні з традиційними методами, такими як чорні та білі списки. **Отримані наступні результати:** при переході на цілочисельну арифметику, у порівнянні з плаваючою точкою, точність обчислень результату знаходиться у межах допустимої похибки навчання нейромережі, тобто не змінилася. Час виконання зменшився на 30-96%, в залежності від архітектури мікроконтролера. Розмір програми знизився на 22-48% також в залежності від архітектури мікроконтролера. **Висновки.** Було доказано можливість та доцільність використання нейромереж, оптимізованих для мікроконтролерів з обмеженими ресурсами. Це підвищить захищеність систем інтернету речей особливо перед загрозами автентифікації пристроїв та виявленню вторгнень. Визначено перспективи подальших досліджень.

Ключові слова: мікроконтролер, нейромережа, оптимізація, програмна реалізація.

Вступ

Інтернет речей (IoT) почав активно застосовуватися на практиці приблизно з 2008 року. Його використання стрімко зростає, і тепер IoT є частиною повсякденного життя та займає місце в багатьох домівках і на підприємствах.

Зараз, у 2024 році, вже існує 17.08 мільярдів пристроїв IoT, а також очікується, що до 2030 року ця кількість підвищиться до 30 мільярдів пристроїв [1]. Через таку кількість пристроїв постає питання безпеки як персональних даних, так і проблема використання пристроїв для заподіяння шкоди. Наприклад, атака відома як Mirai, визначає вразливі IoT-пристрої за допомогою таблиці з понад 60 поширених заводських імен користувачів і паролів [2].

Внаслідок цієї атаки на Dnsp DNS виникли проблеми із доступом до багатьох веб-сайтів, зокрема: Twitter, Etsy, Github, Soundcloud, Spotify та інші. Вірус BrickerBot був призначений для запобігання зараженню пристроїв Mirai, але він, у свою чергу, знищив більше десяти мільйонів пристроїв.

Таким чином, IoT є дуже вразливим до кібератак, особливо через відсутність стандартів безпеки та вимог до безпеки [3, с.1-3]. Через низьку захищеність багатьох пристроїв IoT зловмисники знайшли багато способів атакувати подібні пристрої. Методи та засоби атаки можуть відрізнятися в залежності від самого пристрою IoT, його апаратного та програмного забезпечення, мережі, до якої підключений пристрій IoT та програми, з якою пристрій взаємодіє. На рис. 1 наведено типову схему IoT.

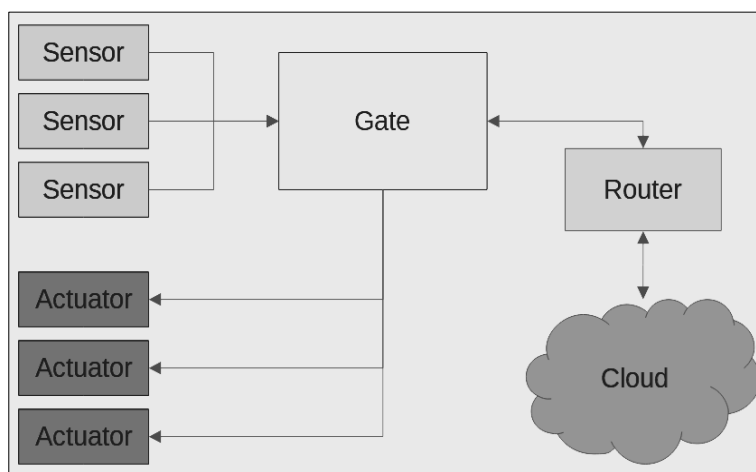


Рис. 1. Типова структура IoT

Аналіз літературних джерел [4-8] та досвід роботи фахівців IoT показує, що більшість атак відбуваються через підключення до мережевого шлюзу або хмарного серверу.

Постановка проблеми

Машинне навчання широко застосовуються для покращення безпеки мережі, наприклад: автентифі-

кація, контроль доступу і виявлення шкідливих програм. Пристрої IoT можуть застосовувати методи контрольованого навчання для виявлення зловмисного програмного забезпечення. У схемі виявлення зловмисного програмного забезпечення, яка розроблена у [9, с.5], пристрій IoT використовує K-NN і класифікатори випадкового лісу для створення моделі виявлення зловмисного програмного забезпечення. Цей пристрій фільтрує пакети TCP і вибирає необхідні параметри, включаючи номер і довжину кадру та зберігає їх в базі даних. Згідно з експериментами в [9, с.10-11], справжній позитивний показник виявлення шкідливих програм на основі K-NN і схеми на основі випадкового лісу з набором даних MalGenome становить 99,7% і 99,9% відповідно.

Пристрої IoT можуть завантажувати журнали мережевого трафіку на сервери в хмарі для виявлення зловмисного програмного забезпечення. Сервери мають більшу базу даних, вищу швидкість обчислення, більший обсяг пам'яті та інші обчислювальні ресурси. Набір даних для відправлення у хмару залежить від якості каналу зв'язку для кожного периферійного пристрою та обсягу даних [10].

У такій схемі роботи, де центральний вузол (хмара) накопичує дані, створює та навчає необхідні конфігурації нейромережі, а пристрої IoT тільки виконують обчислення цих нейромереж, все одно постає проблема ресурсів. Більшість пристроїв IoT базуються на малих мікроконтролерах з обмеженими обсягами пам'яті програм та даних. Ресурси таких мікроконтролерів не дозволяють використовувати операційні системи та наявні бібліотеки, такі як TensorFlow або Brain.js [11]. Такі пристрої навіть не можуть проводити обчислення нейромереж у реальному часі, так як окрім самого обчислення, потрібно ще виконати операції нормалізації та перетворення даних.

Виконання усіх обчислень за допомогою цілочисельної арифметики покращує як проблему швидкодії (так як більшість систем команд мікроконтролерів створені тільки для роботи з цілими числами), так і вирішує проблему перетворення і нормалізації даних, так як абсолютна більшість параметрів мережевих протоколів є цілими числами які і так нормалізовані через розмір відповідних полів протоколу.

У зв'язку з цим, метою дослідження є оптимізація обчислення нейромережі, не використовуючи сторонні бібліотеки або додаткові апаратні засоби (такі як сопроцесор), а використовуючи тільки засоби з бібліотеки glibc, яка є відкритою реалізацією стандартної бібліотеки C, що дозволить значно розширити використання нейромереж у мікроконтролерах, а також дозволить уникнути потенційних проблем з ліцензіями.

Основна частина роботи

Для перевірки можливості оптимізації обчислення нейромереж було проведено наступний експеримент. Його план полягає у наступному:

1. Створити набір даних для тренування нейромережі. Буде використовуватися постійно для порівняння результатів.

2. Змоделювати нейромережу за допомогою brain.js.

3. Переробити обчислення цієї нейромережі на мові C з використанням плаваючої точки та з використанням цілочисельної арифметики.

4. Провести дослідження швидкодії обчислення отриманих нейромереж на декількох архітектурах мікроконтролерів та зробити висновок о доцільності даного підходу.

Для експерименту будемо використовувати дані з мережевого протоколу UDP. Цей метод також підходить для будь-якого комунікаційного інтерфейсу де визначені апаратна адреса, програмна адреса та розмір пакета. Разом усі ці параметри дозволяють визначити типову модель поведінки для пристроїв інтернету речей, а на основі цієї моделі - робити розпізнавання свій-чужий, в залежності від типової чи нетипової поведінки.

Слід зауважити, що всі пакети прийняті центральним мікроконтролером від хмари, будуть мати MAC-адресу роутера. Але, для зв'язку з сенсорами (sensor) та приводами (actuator), де зв'язок іде на пряму, ці дані є актуальними.

Для створення набору даних була написана програма на мові C, яка за допомогою генератора довільних чисел створювала набір даних у двох форматах: json для використання у brain.js та .h для використання у програмах на мові C. Усього було створено 10000 записів, які імітують реальну модель використання. На основі цих даних та за допомогою бібліотеки Brain.js було створено та навчено 2 нейромережі прямого розповсюдження, тобто без зворотного зв'язку. Такі нейромережі найкраще підходять для задач розпізнавання образів та класифікації даних. Перша нейромережа була обрана з мінімальною кількістю нейронів у внутрішньому шарі (4 - по кількості входів). Друга - навпаки, з максимальною доцільною кількістю (два шари: 8 та 16 нейронів відповідно). Як активатор було обрано сигмовидну функцію. Вона нелінійна і також є предметом для дослідження швидкодії та оптимізації, на відміну від лінійної функції-випрямляча (rectifier, ReLU) яка не представляє жодної проблеми при обчисленні.

На рис. 2 зображена нейромережа з 4 нейронами у внутрішньому шарі, як її представляє бібліотека Brain.js.

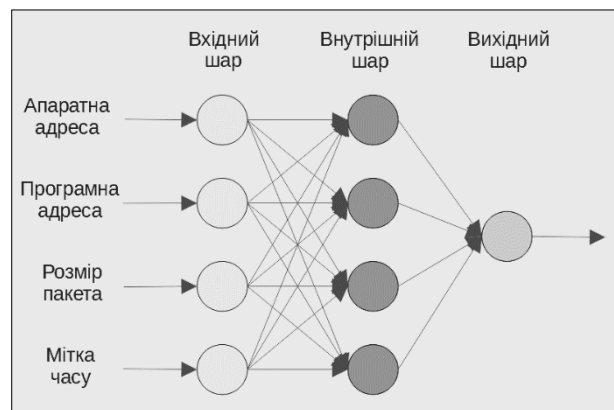


Рис. 2. Структура нейромережі з 4 нейронами у внутрішньому шарі

Слід зазначити, що вхідний шар не використовується для обчислень, а тільки для встановлення значень вхідних параметрів.

Бібліотека Brain.js дозволяє зберігати навчені нейромережі у .json форматі, тому відомі вагові коефіцієнти кожного нейрона. Також Brain.js є відкритою бібліотекою, тому програмний код функції `_runInputSigmoid()` також відомий і її можливо перекодувати на мові C [12]. Окрім переходу на цілочисленні обчислення, був також проведений експеримент з типом даних float. На відміну від 64-бітного типу double, який використовується у Brain.js, тип float має розмір 32 біта. Це повинно значно скоротити як час обчислення, так і обсяг пам'яті, необхідний для зберігання конфігурації нейромережі.

При обчисленні за допомогою цілих чисел використовувалося 32-бітне слово у форматі наведеному на рис. 3. Якщо спрощено, то це звичайні знакові 32-бітні цілі числа (тип `int32_t` визначений у `stdint.h`), де старший байт - це ціла частина та знак, а 3 молодші байти - це дрібна частина. Наприклад, число 1.5 буде виглядати як `0x01800000`, а максимальне число буде `127.99999994 (0x7FFFFFFF)`.

| | | |
|-------|--------------|----------------|
| 1 біт | 7 біт | 24 біта |
| знак | ціла частина | дрібна частина |

Рис. 3. Формат даних з псевдоплаваючою точкою

Обчислення при перетворенні робиться на етапі формування таблиці коефіцієнтів нейромережі та не виконується у реальному часі, тобто немає затрат на конвертацію даних. Також плюсом використання цілих чисел є відсутність необхідності виконувати операції ділення чи множення під час нормалізації даних. Ці дані є параметрами мережевих протоколів, максимальні значення задані розміром відповідних полів заголовків протоколів, і кратні 2. Тому при нормалізації здебільшого використовується операція зсуву, що теж підвищує швидкодію.

У ході роботи програми використовується 3 основних операції, додавання, множення та обчислення сигмовидної функції:

- Операція додавання не потребує будь-яких додаткових перетворень та виконується як додавання двох 32-бітних знакових цілих чисел, для більшості

32-бітних архітектур це буде виконуватися за 1 цикл процесора.

- Операція множення виконується як множення 32 біта на 32 біта з результатом у 64 бітах та зі зсувом цього результату на 24 біта вліво. У архітектурі ARM множення за допомогою інструкції `SMULL` займає 3 цикла процесора, зсув також займе декілька циклів [13]. Для інших архітектур, наприклад AVR, дану операцію можна переписати на асемблері щоб уникнути непотрібних операцій з бібліотеки C, тим самим значно скоротивши час виконання. Дуже важливо, що у даному випадку один із множників завжди не більший за 1 (результат або нормалізації вхідних даних, або результат сигмовидної функції), тому переповнення не виникає.

- При обчисленні сигмовидної функції був обраний найшвидший варіант з можливих - табличний. Він можливий тільки для цілих чисел, тому що аргумент використовується як індекс у таблиці. Так як сигмоїда — це S-подібна функція, то у таблиці можна зберігати тільки частину результатів. Для даного випадку було обрано зберігати 256 значень у діапазоні від 0 до 7, тобто 3 цілих розрядів та 5 дрібних. Така таблиця займає рівно 1 кБ, що є більшим ніж розмір коду для обчислення експоненти з математичної бібліотеки C. Але, зважаючи на великі обсяги пам'яті програм у сучасних мікроконтролерах та значне скорочення часу виконання, це не є критичним недоліком.

Було проведено моделювання роботи нейромережі з використанням цілочисельної арифметики, а також з використанням типу даних float. На даному етапі не виконувалася оцінка швидкодії, а виконувалося тільки порівняння результатів. Тому моделювання виконувалося на ПК. Аналіз проводився методом подачі на вхід нейромережі тих же самих даних для навчання та порівняння значень вихідних нейронів між собою.

Порівняння показало практично повну ідентичність результатів, різниця вихідних значень знаходиться у межах похибки. У табл. 1 приведено порівняння результатів роботи еталонної нейромережі Brain.js та нейромережі, оптимізованих за допомогою мови C. Вказані мінімальне, максимальне та середнє відхилення значень вихідного нейрона на наборі у 10000 тестових даних.

Таблиця 1 – Відхилення результатів роботи нейромережі від еталонних

| Відхилення | Нейромережа [4] | | Нейромережа [8, 16] | |
|-------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| | Між Brain.js та Float | Між Brain.js та Integer | Між Brain.js та Float | Між Brain.js та Integer |
| Мінімальне | 0.000002999 | 0 | 0.000015999 | 0 |
| Максимальне | 0.017194478 | 0.053537817 | 0.035021356 | 0.1162835 |
| Середнє | 0.000616933 | 0.00102014 | 0.002131325 | 0.00963141 |

Набагато більший вплив має інтерпретація результатів, тобто що вважати 1 (свій), а що – 0 (чужій).

Різні порогові значення значно змінюють бінарний результат, але, знов таки, усі отримані результати

майже ідентичні. Тому у цій частині експерименту було зроблено висновок про можливість оптимізації обчислення нейромережі та доцільність наступного етапу експерименту - оцінки часу виконання роз-

рахунку. У табл. 2 наведені результати розпізнавання результату роботи нейромережі (значення вихідного свій-чужий в залежності від порогів визначення нейрона).

Таблиця 2 – Порівняння результатів роботи нейромереж

| Параметри визначення | Тип результату | Нейромережа [4] | | | Нейромережа [8, 16] | | |
|----------------------------------|---|-----------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | Brain | Float | Int | Brain | Float | Int |
| “1” - [1; 0.9] “0” - (0.1, 0] | Не Визначено | 132 | 130 | 133 | 1189 | 1189 | 1199 |
| | Кількість помилок (фальш-позитивні / фальш-негативні) | 37 (37 / 0) | 37 (37 / 0) | 37 (37 / 0) | 79 (26 / 53) | 79 (26 / 53) | 77 (27 / 50) |
| “1” - [1; 0.5] “0” - (0.5; 0] | Кількість помилок (фальш-позитивні / фальш-негативні) | 46 (46 / 0) | 47 (47 / 0) | 47 (47 / 0) | 157 (33 / 124) | 158 (33 / 125) | 157 (34 / 123) |

Заключною частиною експерименту була оцінка швидкодії виконання обчислень та визначення приросту продуктивності. Для тесту був використаний мікроконтролер STM32L476 виробництва ST Electronics на базі ядра Cortex-M4. Цей мікроконтролер є дуже популярним серед пристроїв інтернету речей через низьке енергоспоживання, високу продуктивність та розвинуту інфраструктуру. Ядро ARM Cortex також є дуже широко поширеним, тому результати можуть бути застосовані і для великої кількості інших мікроконтролерів. Також було використане моделювання для архітектури AVR виробництва Microchip (ATMEL) за допомогою симулятора.

Було виконано заміри часу виконання нейромережі на типу даних double (64 біт, еталон), а також float та integer (32 біт). Для типів даних з плаваючою комою були виконані розрахунки як з використанням експоненціальної функції як із стандартної бібліотеки математики libm, так і з використанням її спрощеного варіанта.

У табл. 3 приведені заміри часу одного повного обчислення різних варіантів нейромережі на процесорі Cortex-M4 з частотою 80 МГц, вимірювання виконувалося за допомогою осцилографа.

У табл. 4 приведені такі ж самі результати, але для процесора архітектури AVR, який працює на частоті 16 МГц. Обчислення для типу даних double не виконувалися, тому що стандартна бібліотека C для цієї архітектури не розрізняє типи double та float – вони обидва мають розмір 32 біта.

Виходячи з даних, наведених у табл. 1 та 3, можливо зробити висновок, що при переході на цілочисельну арифметику, у порівнянні з плаваючою точкою, точність обчислень результату знаходиться у межах допустимої похибки навчання нейромережі, тобто не змінюється (згідно табл. 1, максимальне середнє відхилення від еталону менше 1%).

Час виконання зменшився приблизно у 30 разів, в залежності від архітектури нейромережі (табл. 3 та 4, час обчислення).

Таблиця 3 – Результати роботи на процесорі Cortex-M4, 80 МГц

| Тип даних | Час обчислення, нейромережа [4], мкс | Час обчислення, нейромережа [8,16], мкс | Використання пам'яті програм, байт | Використання пам'яті даних, байт |
|------------------------|--------------------------------------|---|------------------------------------|----------------------------------|
| double, sigmoid | 688 | 3240 | 7828 | 9644 |
| double, rough_sigmoid | 428 | 2144 | 6800 | 9564 |
| float, sigmoid | 116.8 | 257 | 7132 | 5036 |
| float, rough_sigmoid | 94.4 | 163.6 | 6496 | 4956 |
| integer, table sigmoid | 22.64 | 103.2 | 6100 | 4956 |

Таблиця 4 – Результати роботи на процесорі AVR, 16 МГц

| Тип даних | Час обчислення, нейромережа [4], мкс | Час обчислення, нейромережа [8,16], мкс | Використання пам'яті програм, байт | Використання пам'яті даних, байт |
|------------------------|--------------------------------------|---|------------------------------------|----------------------------------|
| float, sigmoid | 14906 | 80002 | 7444 | 4802 |
| float, rough_sigmoid | 10558 | 61152 | 7152 | 4802 |
| integer, table sigmoid | 8154 | 55669 | 7932 | 4802 |

Розмір програми знизився пропорційно типу даних тому що значна частка - це зберігання конфігурації нейромережі).

Також при переході від 64-бітового типу даних до 32-бітового, обсяг пам'яті, необхідний для зберігання конфігурації нейромережі, аналогічно зменшується у 2 рази (табл. 3, використання пам'яті даних).

Висновки та перспективи подальших досліджень

Для архітектури Cortex-M4, обчислення за 100 мкс (найскладніша з розглянутих конфігурацій) робить можливим використання нейромереж для розпізнавання свій-чужий у реальному часі.

Архітектура AVR непридатна для таких операцій, для неї повинні використовуватися табличні методи, наприклад чорні та білі списки. За допомогою оптимізації обчислення множення 32 біта на 32 біта з

результатом у 64 бітах на мові асемблера, можна досягти ще значнішого зниження часу виконання, але все одно він залишиться неприйнятним.

Виходячи з отриманих результатів, нейромережі можливо використовувати у малих мікроконтролерах з обмеженими ресурсами. Це відкриває перспективи подальших досліджень у сфері штучного інтелекту для захисту інтернету речей. За допомогою нейромереж можна створювати поведінкові моделі використання пристроїв, та на їх основі проводити розпізнавання свій-чужий, виявляти аномальну поведінку та виявляти вторгнення.

Наступні дослідження будуть стосуватися вибору набору параметрів мережевих протоколів, як то IP-адреса, порт, розмір пакета та інше, а також створення початкового універсального набору даних, який пришвидшить подальше навчання системи працюючою вже згідно власної моделі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Duarte F. Number of IoT Devices. 2024. URL: <https://explodingtopics.com/blog/number-of-iot-devices>
2. Ragan S. Here are the 61 passwords that powered the Mirai IoT botnet. Csoonline, 2016. URL: <https://www.csoonline.com/article/3126924/here-are-the-61-passwords-that-powered-the-mirai-iot-botnet.html>
3. Vorakulpipat C., Rattanalardnusorn E., Thaenkaew P., Hai H.D. Recent challenges, trends, and concerns related to IoT security: an evolutionary study. IEEE, 2018. DOI: <https://doi.org/10.23919/ICACT.2018.8323774>
4. Abdul-Ghani H.A., Konstantas D., Mahyoub M. A comprehensive IoT attacks survey based on a building-blocked reference mode. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 9, No. 3, 2018. С. 355–373. URL: <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2018.090349>
5. Заковоротний О.Ю., Орлова Т.О. Порівняльний аналіз хмарних та туманних середовищ Інтернету речей. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2023, випуск 2(72). С. 152–154. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.152>
6. Melamed T. An active man-in-the-middle attack on Bluetooth smart devices. *Safety and Security Eng.*, Vol. 8, No. 2, 2018. С. 200–211. URL: <https://www.witpress.com/Secure/ejournals/papers/SSE080202f.pdf>
7. De Donno M., N Dragoni N., Giaretta A. Analysis of DDoS-capable IoT malwares. IEEE, 2017. DOI: <https://doi.org/10.15439/2017F288>
8. Cekerevac Z., Dvorak Z., Prigoda L., Cekerevac P. Internet of things and the man-in-the-middle attacks–security and economic risks. *MEST Journal*, 2017. 11 с. DOI: <https://doi.org/10.12709/mest.05.05.02.03>
9. Narudin F.A., Feizollah A., Anuar N.B., Gani A. Evaluation of machine learning classifiers for mobile malware detection. *Soft Computing*, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00500-014-1511-6>
10. Xiao L., Li Y., Huang X., Du X.J. Cloud-based malware detection game for mobile devices with offloading. IEEE, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMC.2017.2687918>
11. Brain.js: GPU accelerated Neural networks in JavaScript. URL: <https://brain.js.org/#/> (дата звернення 20.03.2024).
12. Github: Some cool AI tools. Now the community carries the torch. URL: <https://github.com/BrainJS/brain.js/blob/master/src/neural-network.ts>
13. Cortex-M3 Devices Generic User Guide. URL: <https://developer.arm.com/documentation/dui0552/a/the-cortex-m3-instruction-set>

Received (Надійшла) 19.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.04.2024

Optimization of neural network computation using integer arithmetic

Oleksandr Zakovorotnyi, Andrii Khulap

Abstract. Most of the sensor devices in the Internet of Things systems are based on energy-efficient microcontrollers, the computing resources of which are limited, as well as the amount of available memory. Increasing the security of the use of such devices with the help of neural networks is an important and urgent problem. The article describes the possibility of using artificial neural networks in small microcontrollers with limited resources. **The purpose of this work** is to check the possibility of calculating neural networks based on integer arithmetic to reduce the time of calculating a neural network and eliminate data normalization operations, as well as to evaluate the feasibility of using such neural networks in the field of security of the Internet of Things in comparison with traditional methods, such as black lists and white lists. **The following results were obtained:** when switching to integer arithmetic, compared to floating point, the accuracy of the result calculations is within the permissible error of neural network training, that is, it has not changed. Execution time decreased by 30–96%, depending on the architecture of the microcontroller. The program size is reduced by 22–48%, also depending on the microcontroller architecture. **Conclusions:** the possibility and expediency of using neural networks optimized for microcontrollers with limited resources was proved. This will increase the security of Internet of Things systems, especially against device authentication threats and intrusion detection. Prospects for further research are determined.

Keywords: microcontroller, neural network, optimization, software implementation.

В. Д. Залеський, П. С. Івановський, В. М. Федорченко

Харківський національний технічний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

СУЧАСНІ ІНСТРУМЕНТИ ОРКЕСТРАЦІЇ ДАНИХ ДЛЯ ПОБУДОВИ КОНВЕЄРІВ АВТОМАТИЧНОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ

Анотація. Всесвіт даних у сучасних компаніях постійно розширюється. Зі збільшенням кількості даних збільшується потреба в управлінні, синхронізації розкладів та вирішення проблем обробки. Компаніям потрібно зламати бар'єри між джерелами даних та сховищами, щоб по-справжньому використовувати всю інформацію, яку вони збирають. Оркестрація даних дозволяє організаціям автоматизувати та оптимізувати свої дані, перетворюючи їх на оперативні активи, щоб цінну інформацію можна було використовувати для прийняття бізнес-рішень у режимі реального часу. За деякими оцінками, 80% роботи, пов'язаної з аналізом даних, зводиться до збирання та підготовки даних, що означає, що оркестрація даних може скоротити велику кількість часу на обробку та планування. **Метою даної роботи** є аналіз сучасних інструментів оркестрації. **Об'єктом дослідження** є дані інженерії. **Предметом дослідження** є оркестрація даних.

Ключові слова: оркестрація даних, конвеєри обробки даних, ETL, DAG.

Вступ

Відправною точкою для аналізу даних з нуля - є сценарій, коли організація хоче максимально використовувати свої дані, але не має всіх даних про клієнтів в одному місці. Організація не може централізувати та оновлювати дані про клієнтів. Дані можуть бути ненадійними або неточними.

Оркестрація даних ідеально підходить для організацій даних з багатьма системами, оскільки не потребує масового перенесення даних до сховища. Натомість, вона надає доступ до потрібних даних, у потрібному форматі та в потрібний час. Інформацію, яка зберігається в різних сховищах, можна легко отримати та обробляти синхронно, ніби дані знаходяться в централізованому репозиторії [1].

Центральну роль в оркестрації даних відіграє ETL процес [2], він розшифровується як "вилучення (extract), перетворення (transform), завантаження (load)".

Етап вилучення передбачає підготовку перевірку цілісності та правильності даних, додавання міток та позначень або збагачення нових сторонніх даних наявними наборами даних.

Етап перетворення передбачає виявленні та виправленні (або видаленні) пошкоджених, неточних, дублюючих або аномальних даних та перетворення їх у стандартний формат.

Після того, як необроблені дані видобуто та адаптовано, вони завантажуються в цільову систему, що забезпечує синхронізацію - безперервний процес оновлення даних між джерелами та призначеннями для забезпечення їх узгодженості [3-6].

Коротка історія розвитку оркестрації робочих процесів

Оркестрація даних часто плутають з оркестрацією робочих процесів. Оркестрація робочих процесів - це процес запуску та моніторингу стану завдань. Її сутність - реалізувати аналог event-driven систем на базі пакетної обробки.

Оркестрація даних є підмножиною оркестрації робочих процесів і забезпечує надійну та ефектив-

ного синхронізацію даних у продакшен середовищі. На ряду з елементами ETL вона може також включати: елементи управління середовищем (CI/CD для даних або GitOps для даних або безперервна інтеграція та доставка даних), контроль доступу на основі ролей ("RBAC"), оповіщення та моніторинг стану даних.

Інструменти оркестрації робочих процесів існували вже протягом тривалого часу, але лише нещодавно їх почали називати інструментами оркестрації даних.

Оркестрація даних у сфері обробки даних бере свій початок від великих технологічних компаній. Luigi був створений у Spotify на початку 2010-х років. Airflow, переможець цієї битви та лідер галузі, з'явився у Airbnb. У Meta є дуже схожий внутрішній, непублічний інструмент під назвою DataSwarm.

З того часу з'явилося багато інших пакетів оркестрації робочих процесів із відкритим вихідним кодом.

На відміну від Airflow і Luigi, які дійсно були відкритими (Airflow зрештою є частиною Apache Software Foundation), Prefect, Dagster, Mage, Kestra претендують на те, щоб бути кращими, простішими та зручнішими альтернативами Airflow [7], особливо для організації даних.

По суті, всі вони дуже схожі, пропонуючи фреймворк для написання коду та виконання орієнтованих ациклічних графів (DAG) у контейнеризованому середовищі. Ці інструменти є безкоштовні, але за розгортання та додаткові хмарні функції, такі як логування, контроль доступу на основі ролей, підтримку клієнтів доведеться заплатити.

Огляд сучасних інструментів

До основних характеристик сучасних інструментів оркестрації робочих процесів з відкритим вихідним кодом можна віднести:

1) Визначення DAG за допомогою Git-контролю: інструменти дозволяють користувачам створювати та керувати DAG як кодом, використовуючи переваги Git для версіонування, історії змін та спільної роботи.

2) Інструменти містять планувальник, який виконує DAGs відповідно до визначеного розкладу або інтервалів.

3) Інструменти дозволяють запускати DAG вручну або автоматично на основі певних подій (тригерів). Вони також надають функції моніторингу для відстеження виконання DAG та оповіщення про помилки або успішне завершення. Крім того, інструменти дозволяють керувати DAG, наприклад, зупиняти, перезапускати або оновлювати їх.

4) Більшість інструментів дозволяють користувачам писати логіку DAG на Python, що забезпечує гнучкість та інтеграцію з різноманітними бібліотеками Python для обробки даних та інших завдань.

5) Користувальницький інтерфейс(KI): хоча деякі інструменти орієнтовані на розробку за допомогою коду, багато хто пропонує KI для візуалізації DAG, перегляду історії виконання, налаштування параметрів та керування іншими аспектами робочих процесів.

Перейдемо до безпосереднього розгляду інструментів.

Заснований у 2018 році Prefect [8] позиціонує себе як "новий стандарт автоматизації потоків даних". Зовнішній вигляд інтерфейсу користувача Prefect наведено на рис. 1.

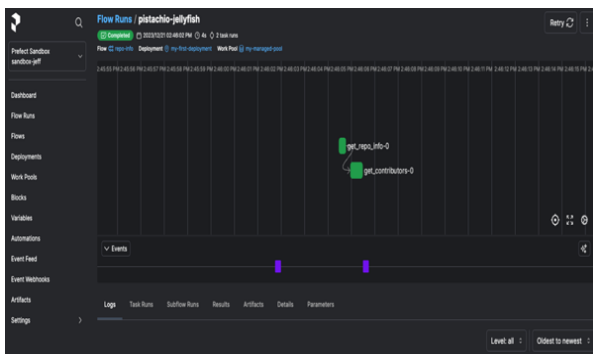


Рис. 1. Зовнішній вигляд KI Prefect

Prefect має зручний KI і спеціально розроблений для роботи з даними. Він пропонує простий і централизований спосіб керування та моніторингу всього стеку обробки даних. Додавши кілька декораторів до Python-коду, можна перетворити свої функції на завдання Prefect і безпроблемно інтегрувати їх у робочі процеси. Prefect доступний розробникам з базовими знаннями Python, що полегшує початок оркестрації конвеєрів обробки даних.

Prefect пропонує унікальну "гібридну модель" для оркестрації робочих процесів, яка вирішує критично важливу проблему, яка постає при використанні хмарних рішень: довіри. Традиційні служби оркестрації вимагають запуску коду клієнта на інфраструктурі провайдера. Це створює проблему довіри: клієнти повинні довіряти постачальнику свій конфіденційний код, а провайдери повинні гарантувати, що код не є зловмисним. Локальні рішення стикаються з аналогічною проблемою довіри, хоча й у протилежному напрямку (клієнти довіряють програмному забезпеченню постачальника).

Prefect Cloud - сервіс, зосереджений виключно на оркестрації, а не на виконанні коду. Це усуває необхідність для клієнтів довіряти Prefect свій код. Клієнти зберігають повний контроль і безпеку: їх код залишається на їх приватній інфраструктурі.

Як працює гібридна модель Prefect?

Клієнти проектують і тестують робочі процеси за допомогою Prefect Core на власній інфраструктурі. Після завершення робочий процес реєструється в Prefect Cloud. При цьому передаються метадані про робочий процес (завдання, залежності, розклад тощо) - не сам код. Prefect Cloud використовує отримані метадані для оркестрації робочого процесу без необхідності в коді. Він керує плануванням розкладу, контролює стани виконання (запуск, успіх, помилка, повторний запуск) і координує кілька паралельних виконань. Далі Prefect Agent, що працює на інфраструктурі клієнта, виконує завдання локально або у віддаленому кластері, та передає стан виконання назад до Prefect Cloud.

Розроблений у 2021 році, Mage [9] - інструмент оркестрації, спеціально розроблений для ETL-конвеєрів даних. Зовнішній вигляд інтерфейсу користувача Mage наведено на рис. 2.

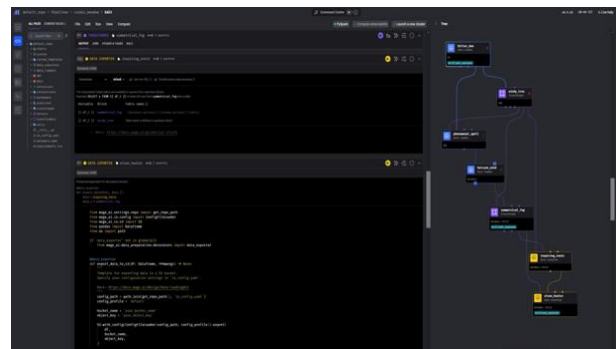


Рис. 2. Зовнішній вигляд KI Mage

Він працює за допомогою блоків, які можуть мати декілька залежностей від попередніх або наступних блоків. Кожен блок має свій ізольований код, призначений для легкого повторного використання в різних конвеєрах.

Mage пропонує зручний KI у вигляді інтерактивного блокнота для легкої розробки. Блокноти підтримують розробку коду на Python, R та SQL і дозволяють не турбуватися надто про обробку винятків, оскільки Mage бере це на себе. За допомогою Mage можна встановлювати зв'язки між різними блоками конвеєра безпосередньо через інтерфейс, що усуває потребу в додатковому коді.

Одна з переваг використання Mage - це можливість переглядати та візуалізувати результати вашого конвеєра даних в режимі реального часу. Це дозволяє перевіряти та аналізувати дані без очікування розгортання в шарі оркестрації.

На додаток до розробки конвеєрів для пакетної обробки, Mage також дозволяє створювати конвеєри для стрімінгу даних. Наразі Mage підтримує Kafka, Azure Event Hub, Google Cloud PubSub, Kinesis та RabbitMQ сервіси для роботи зі стрімінгом даних, що

дозволяє обробляти та аналізувати дані в режимі реального часу.

Слід зазначити що, для запуску повного набору інструментів оркестрації іншим аналогам може знадобитися кілька Docker-контейнерів. Це ускладнює роботу на окремому без серверному Docker-екземплярі, такому як Google Cloud Run або аналогічному Azure Container Instances. Mage робить акцент на простоті, він працює на одному Docker-контейнері, що значно полегшує його розгортання.

Kestra [10] розроблена у 2022 році для полегшення масштабування оркестрації робочих процесів. Вона здатна обробляти збільшення робочого навантаження, дозволяючи розподіляти завдання між декількома вузлами кластеру. Зовнішній вигляд інтерфейсу користувача Kestra наведено на рис. 3.

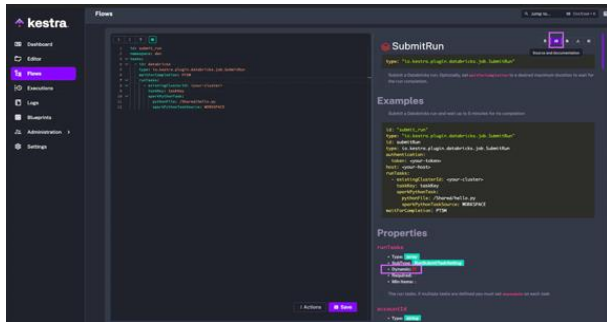


Рис. 3. Зовнішній вигляд КІ Kestra

Останнім часом багато хто порівнює Kestra з Terraform, оскільки обидва інструменти використовують DSL для керування та автоматизації робочих процесів. Terraform справив значний вплив на DevOps, встановивши стандарт IaC. Kestra прагне запровадити схожі принципи в сфері оркестрації та автоматизації, хоча й з деякими відмінностями в підході.

Цей декларативний підхід означає, що визначається бажаний кінцевий стан, а не кроки для досягнення цього стану. За допомогою визначення робочих процесів у конфігураційному файлі YAML, Kestra абстрагується від складнощів процедурного коду, що робить створення, розуміння та підтримку робочих процесів легшими.

Хоча Kestra використовує YAML для визначення робочих процесів, вона пропонує свободу використання будь-якої мови програмування для написання скриптів всередині робочих процесів. Ця незалежність від конкретної мови дозволяє розробникам використовувати свої наявні навички, чи то Python, R, або інші мови.

Дизайн Terraform зосереджений на модульних конструкціях, які дозволяють розділяти складні ресурси на повторно використовувані компоненти. Kestra підтримує цю філософію модульності. За допомогою таких функцій, як креслення (blueprints) та підпроцеси (subflows), вона пропонує структурований підхід до створення робочих процесів, що покращує їх повторне використання та обслуговування. Особливо виділяються підпроцеси Kestra, оскільки вони дозволяють повторно використовувати частини робочих

процесів у різних операціях, полегшуючи оновлення та зміни в єдиному централізованому компоненті.

Заснований у 2022 році, Dagster [11] моделює конвеєри даних з точки зору активів даних, які вони виробляють та споживають. Зовнішній вигляд інтерфейсу користувача Dagster наведено на рис. 4.

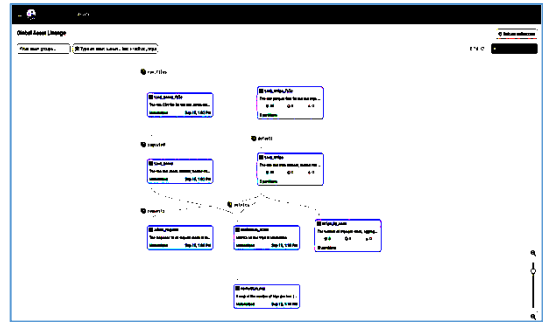


Рис. 4. Зовнішній вигляд КІ Dagster

Актив - це об'єкт у постійному сховищі, наприклад, моделі dbt, таблиці Snowflake або навіть CSV-файли. Програмно-визначений актив - це опис в коді, який повинен існувати і як створювати та оновлювати цей актив. Програмно-визначені активи дозволяють використовувати декларативний підхід до управління даними, в якому код є джерелом істини щодо того, які активи даних повинні існувати і як вони обчислюються.

Dagster вважає, що оркестратор повинен бути обізнаним щодо активів. Ця інформація використовується для побудови Каталогу активів Dagster. Це принципово нового погляду на роботу оркестратора, який пов'язує активи з обчисленнями, що їх генерують. Користувачі можуть переходити до оркестратора, шукаючи створені активи, а не конвеєри, які їх створили.

Для визначення робочого процесу у Dagster користувач пише декоровані функції Python, що визначають обчислення та структуру графа. Подібно до Airflow, реалізація окремого вузла графа може робити все, що може Python. Проте, Dagster вважає, що функції повинні офіційно декларувати свої вхідні та вихідні дані, надавати гарантії типізації для цих даних, визначити необхідну конфігурацію тощо.

Dagster API дозволяє розділити обов'язки між обчисленнями та вводом/виводом. Це необхідна умова для тестування програм для роботи з даними, що забезпечують швидкий зворотній зв'язок для розробників. Наприклад, у режимі "тестування" ресурс може зберігати фрейм даних у файлову систему, а ресурс у режимі "виробництво" може зберігати фрейм даних у сховищі об'єктів, такому як S3

Dagster є достатньо гнучким для виконання обчислень без необхідності спеціальної інфраструктури. Не потрібна інфраструктура, розклад або реєстрація стану для виконання конвеєрів. Структура графа та розклад виконання є розділеними концепціями: розклад та сенсори визначаються незалежно від конвеєра.

Порівняння інструментів оркестрації даних. Порівняльна таблиця інструментів наведена у табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика інструментів оркестрації

| Критерій | Prefect | Mage | Kestra | Dagster |
|------------------------------------|----------------------------|------------------|---------------------------------|--------------|
| Модель виконання | Гібридна (локальна/хмарна) | Контейнеризована | Універсальна | Універсальна |
| Підхід до опису робочих процесів | Декоратори Python | Python | YAML | Python |
| Мови програмування | Python | Python | Python, R, Julia, Node.js, etc. | Python |
| Спільнота | Велика | Зростаюча | Зростаюча | Зростаюча |
| Гнучкість | Висока | Середня | Висока | Висока |
| Масштабованість | Висока | Висока | Висока | Висока |
| Складність використання | Середня | Низька | Низька | Середня |
| Підтримка SaaS та хмарних сервісів | Висока | Висока | Середня | Низька |
| Відображення залежностей | Динамічне | Статичне | Статичне | Статичне |
| Підтримка контейнеризації | Висока | Висока | Середня | Низька |

Висновки

В епоху даних ефективна оркестрація є невід'ємним елементом успішної роботи з даними. Вибір правильного інструменту оркестрації є критичним завданням для будь-якої команди інженерів даних. Кожен інструмент має свої сильні сторони та призначений для різних потреб.

Оптимальний вибір залежить від конкретних вимог, інфраструктури та знайомства команди з інструментом.

Prefect добре підходить, коли в команді не було попереднього досвіду в побудові DAG-ів і потрібний

простий в освоєнні інструмент з великою спільнотою, а також потрібна гібридна модель.

Mage підходить для тих випадків, коли потрібна обробка даних в реальному часі та розгортання в контейнеризованих середовищах.

Kestra чудовий вибір для команд, які не мали попереднього досвіду в побудові DAG-ів але мають гарний досвід з розгортанням інфраструктури з застосування принципів IaC.

Dagster добре підходить для команд, які шукають інструмент для оркестрації dbt процесів та коли надається пріоритет наглядності та простоті у розумінні робочого процесу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Fundamentals of Data Engineering. Authors: Joseph Reis and Matthew Housley -2022. – 447 p.
2. Data Pipelines Pocket Reference: Moving and Processing Data for Analytics. Authors: James Densmore – 2021. – 274 p.
3. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
4. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускної здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
5. Datsenko, S. and Kuchuk, H. (2023), “Biometric authentication utilizing convolutional neural networks”, *Advanced Information Systems*, Vol. 7, no. 2, pp. 87–91, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.2.12>
6. Petrovska, I. and Kuchuk, H. (2023), “Adaptive resource allocation method for data processing and security in cloud environment”, *Advanced Information Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 67–73, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.10>
7. Офіційний сайт Airflow [Electronic resource] – URL: <https://airflow.apache.org/docs/apache-airflow/stable/index.html>
8. Офіційний сайт Prefect [Electronic resource] – URL: <https://docs.prefect.io/latest/>
9. Офіційний сайт Mage [Electronic resource] – URL: <https://docs.mage.ai/introduction/overview>
10. Офіційний сайт Kestra [Electronic resource] – URL: <https://kestra.io/docs>
11. Офіційний сайт Dagster [Electronic resource] – URL: <https://docs.dagster.io/getting-started/what-why-dagster>

Received (Надійшла) 22.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.04.2024

Modern data orchestration tools for building big data processing pipelines

V. Zaleskyi, P. Ivanovskii, V. Fedorchenko

Abstract. The data universe in modern companies is constantly expanding. As the amount of data grows, so does the need for management, schedule synchronization, and processing challenges. Companies need to break down the barriers between data sources and storage in order to truly utilize all of the information they collect. Data orchestration allows organizations to automate and optimize their data, transforming it into operational assets so that valuable insights can be used for real-time business decision making. By some estimates, 80% of the work involved in data analysis is spent on data collection and preparation, meaning that data orchestration can significantly reduce the amount of time spent on processing and scheduling. **The goal of this work** to overview modern data orchestration tools. **The object of research** is data engineering. **The subject of research** is data orchestration. **Conclusions.** In the age of big data, effective orchestration is an integral part of successful data work. Choosing the right orchestration tool is a critical task for any data engineering team. Each tool has its own strengths and is designed for different needs. The optimal choice depends on the specific requirements, infrastructure, and the team's familiarity with the tool.

Keywords: data orchestration, data processing pipeline, ETL, DAG.

Г. С. Іващенко, О. І. Онищенко, М. Е. Бондаренко, Н. В. Здорик

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МЕТОДИ РІШЕННЯ ЗАДАЧІ КОМІВОЯЖЕРА НА ОСНОВІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Анотація. **Актуальність.** На сьогоднішній день, задача комівояжера зберігає свою актуальність, оскільки потреба у пошуку найкоротших маршрутів наразі зустрічається в багатьох сферах людської діяльності. Із розвитком технологій та зростанням складності виробничих процесів та логістики, підвищуються вимоги до точності та швидкості пошуку, що зумовлює необхідність вибору доцільних методів рішення цієї задачі. **Метою даної роботи** є дослідження ефективності використання алгоритмів рішення задачі комівояжера на основі методів обчислювального інтелекту. **Об'єктом дослідження** є процес пошуку найкоротшого маршруту у графах великої розмірності. **Предметом дослідження** є алгоритми пошуку маршрутів для задачі комівояжера з використанням методів обчислювального інтелекту. **Результати.** У даній роботі розглядаються особливості застосування методів обчислювального інтелекту для вирішення задачі комівояжера, що полягають у використанні варіацій генетичного, мурашиного алгоритмів та штучних нейронних мереж, зокрема, карти Кохонена. Проведено аналіз збіжності генетичних алгоритмів при використанні різновидів генетичних операторів. Отримані результати проведених експериментальних досліджень дозволяють зробити висновки щодо переваг та недоліків окремих алгоритмів. **Висновок.** Запропонований підхід на основі штучної нейронної мережі демонструє найкращу швидкість та найбільшу точність при вирішенні задач розмірністю приблизно 1000 вершин. Для задач з меншим числом вершин, точніші результати забезпечує використання генетичного алгоритму.

Ключові слова: задача комівояжера, маршрут, граф, генетичний алгоритм, кросовер, мутація, селекція, мурашиний алгоритм, штучні нейронні мережі, карта Кохонена

Вступ

Із розвитком технологій, такі галузі людської діяльності, як транспорт і логістика, виробництво, телекомунікації, поступово стають все складнішими, і потребують нових ефективних методів зменшення витрат часу, матеріальних та інтелектуальних ресурсів. З цієї причини, зростає актуальність у більш ефективних методах рішень задачі комівояжера (ЗК) – однієї з найпоширеніших задач комбінаторної оптимізації теорії графів, направленої на пошук найкоротших маршрутів [1].

ЗК відноситься до класу NP-повних задач, тому зі збільшенням кількості вершин, варіативність можливих рішень зростає з факторіальною складністю, і пошук найкращого можливого рішення за прийнятний час унеможливується [2]. В такому випадку доцільним є застосування евристичних алгоритмів [3], завдяки їх здатності знаходити наближені до точних рішення в умовах високої обчислювальної складності задачі. Перспективним напрямком є використання тісно пов'язаних з евристичними алгоритмами методів обчислювального інтелекту, таких як штучні нейронні мережі, еволюційні підходи, ройовий інтелект тощо [4].

Одним з широко використовуваних підходів машинного навчання для пошуку рішень ЗК є генетичні алгоритми (ГА), які дозволяють пришвидшити пошук за рахунок розгляду обмеженої множини можливих рішень замість загального перебору великої кількості маршрутів, мають здатність ітеративно покращувати знайдені варіанти рішення шляхом модифікації наявних та відбору найкращих варіантів маршрутів. Широкі можливості модернізації зумовлюють вибір ГА предметом досліджень багатьох актуальних наукових робіт, зокрема пов'язаних з вирішенням ЗК. В [5, 6] встановлено, що комбінування різних

реалізацій операторів генетичного алгоритму (кросоверу, селекції, мутації, відбору) та конфігурування їх вхідних параметрів забезпечує високу ефективність вирішення завдань комбінаторної оптимізації, але залишається актуальною проблема швидкої (передчасної) збіжності алгоритму.

Іншим напрямком вирішення ЗК є використання мурашиного алгоритму, що являє собою модель багатоагентної системи, де результат роботи кожного агента (поточний шлях обходу графу) впливає на діяльність інших і таким чином поступово надається перевага найкращим маршрутам все більшій кількості агентів. Можливість визначити гетерогенність агентів та налаштувати їхню поведінку, зміни порядку оновлення феромону на маршрутах, а також підбір початкових умов, як запропоновано в [7], дозволяють знаходити кращі рішення ЗК.

Перспективним підходом для вирішення ЗК також є використання штучних нейронних мереж (ШНМ). Здатність ШНМ адаптуватися до складних структур даних зумовлює результативність такої архітектури, як самоорганізуюча карта Кохонена, у вирішенні ЗК. Використання мережі з топологією замкнутого кільця, описане в [8], дає змогу застосовувати алгоритм при пошуку маршрутів для ЗК, але проблема появи окремих відгалужень на маршруті у процесі роботи ШНМ перешкоджає знаходженню найкоротших шляхів.

В ході аналізу результатів існуючих досліджень, зроблено висновок, що результативність описаних алгоритмів наразі є недостатньою, та існують ще не задіяні напрямки вдосконалення поширених підходів, що потребують більш детального експериментального дослідження.

Метою цієї роботи є дослідження особливостей використання підходів машинного навчання, таких як генетичні алгоритми, мурашині алгоритми та

самоорганізуюча карта Кохонена для вирішення задачі комівояжера. Особлива увага має бути приділена дослідженню впливу параметрів налаштувань зазначених методів на ефективність пошуку найкоротшого шляху обходу графів великого розміру.

Постановка задачі

Математична модель задачі комівояжера визначається наступним чином: даний повнозв'язний зв'язаний граф, що має N вершин, та матриця $C = |c_{ij}|$ розмірності $N * N$, яка містить значення вартості (відстані) переходу з вершини i до вершини j . Варіант рішення ЗК – шлях обходу графу, який визначається як матриця $X = |x_{ij}|$, $x_{ij} \in \{0, 1\}$, де значення 1 означає наявність переходу з вершини i до вершини j у знайденому циклі, 0 задається в протилежному випадку. Найкращим рішенням є шлях, який має найменшу можливу вартість

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

і кожна вершина включена до маршруту тільки один раз, тобто має тільки одну вхідну, та тільки одну вихідну дуги:

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n x_{ij} = \sum_{i=1, i \neq j}^n x_{ij} = 1, (i, j = \overline{1, n}). \quad (2)$$

Крім того, має існувати лише один шлях, що включає одразу всі вершини графа, що визначається умовою

$$u_i - u_j + n x_{ij} \leq n - 1, i, j = \overline{1, n}, i \neq j. \quad (3)$$

Для дослідження методів вирішення ЗК обрані набори вихідних даних, наявні у бібліотеці TSPLIB, яка надає набір готових екземплярів ЗК із заздалегідь визначеними найкоротшими маршрутами, що дозволяє порівнювати точність реалізованих алгоритмів. Для проведення експериментів обрані екземпляри симетричної ЗК, вершини яких задані в декартовій системі координат. Для дослідження результативності обраних у роботі методів вирішення на задачах різної розмірності вирішено розглядати ЗК на графах, що містять від 100 до 1000 вершин.

Рішення задачі комівояжера методами обчислювального інтелекту

Генетичні алгоритми (ГА) засновані на імітації природних еволюційних процесів та інтерпретації явищ генетики та оперують певними об'єктами – особинами, які відрізняються один від одного своїм генотипом (множиною характеристик, що описують рішення та визначають його пристосованість).

В ході дослідження сформульовано ряд умов, які дозволять знайти наближені рішення ЗК за допомогою ГА. Особинами вирішено вважати маршрути, що відносяться до множини можливих рішень ЗК, тобто такі, що відповідають умовам (2) і (3). Для кодування генів обрано шляхове представлення – генотипом буде вважатися перелік вершин маршруту у

порядку обходу, а за показник пристосованості приймається довжина шляху. Відповідно до (1), чим меншою є довжина маршруту – тип більш пристосованою буде вважатися особина.

При пошуці найбільш результативного варіанту ГА досліджуються комбінації різних реалізацій основних операцій – кросовера, мутації та селекції.

Серед кросоверів розглянуті упорядкований (Order Crossover, OX) [9], одноточковий порядковий кросовер (Single Point Ordered Crossover, SPOX), кросовер із частковим відображенням (Partially-Mapped Crossover, PMX) [10], циклічний кросовер (Cycle Crossover, CX) [11], реорганізуючий (Order-based Crossover, OBX) [12] та кросовер з інверсією за опорним елементом (Inver-Over Crossover, IOX) [13]. Одноточковий порядковий кросовер є модифікацією OX, в якій задається тільки індекс кінця фрагменту, а початок фрагменту збігається з початком генотипу.

Задіяні реалізації мутацій включають обмін двох фрагментів генотипу, зсув фрагменту та інверсію фрагменту маршрутів. Використання мутацій сприяє збереженню різноманіття у популяції та запобігає потраплянню у локальні оптимуми.

У якості операторів відбору особин для схрещування для створення нового покоління використовуються варіації турнірного методу та методу рулетки.

В залежності від принципу дії, операції ГА можуть мати власні параметри: номери позицій для визначення фрагментів у випадку кросоверів, параметри для мутацій (довжина фрагменту для обміну, позиція початку фрагменту, його довжина та кількість позицій для зсуву, початкова і кінцева позиції інтервалу для інверсії). З метою дослідження впливу вхідних параметрів операторів ГА на отримувані результати, реалізовані такі способи ініціалізації цих параметрів: «manual» (ручне внесення) – значення параметра задається користувачем один раз і більше не змінюється, «one time» – значення генерується випадково один раз і більше не змінюється, «every generation» – нове випадкове значення задається на кожне нове покоління, «every individual» – нове випадкове значення задається для обробки кожної особини (пари осіб у випадку кросовера) в межах одного покоління.

Однією з головних проблем при використанні ГА є передчасна збіжність, яка полягає у поступовому зменшенні різноманіття генотипу популяції протягом роботи алгоритму. Поява особин з однаковим генотипом значно гальмує чи зовсім зупиняє пошук нових, можливо, кращих рішень. Швидкість розвитку цього явища може залежати від розміру популяції, числа поколінь та виконання операцій ГА (зокрема, ймовірності та ступеню мутації). З метою аналізу та пошуку методів запобігання передчасної збіжності, запропоновано критерій оцінки – показник виродження популяції D , який вираховується як лінійна (4) або квадратична функція (5):

$$D = \frac{A-1}{N-1}, A = \overline{1, N}, D \in [0;1], \quad (4)$$

$$D = \frac{A^2-1}{N^2-1}, A = \overline{1, N}, D \in [0;1], \quad (5)$$

де A – кількість унікальних генотипів у популяції, N – загальний розмір популяції. Виродження складає 0, якщо $A = N$, тобто коли кожна особина у популяції має унікальний генотип, і збільшується до 1 зі зростанням кількості повторюваних рішень, що описуються варіантами маршрутів, представлених у особинах популяції (рис. 1).

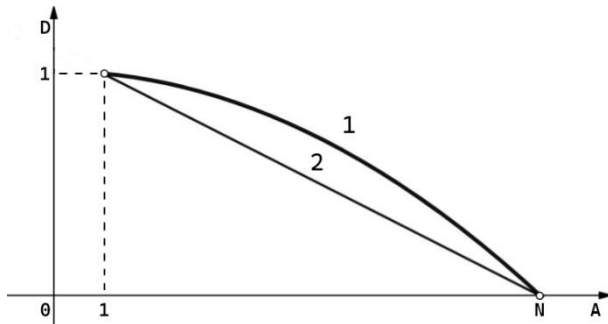


Рис. 1. Графіки квадратичної (1) та лінійної (2) функцій оцінки виродження популяції ГА

У реалізованих ГА передбачено першочергові умови зупину за відсутністю покращень рішень (якщо найкращий результат не змінюється протягом заданого числа поколінь), та за виродженням популяції (при досягненні показником виродження певного вказаного значення). Для обох варіантів також вказується максимальне число поколінь, після якого алгоритм припинить роботу, якщо першочергова умова зупинки не виконається до того часу.

В роботі також розглянуто використання мурашиного алгоритму (МА), в основі якого поведінка однойменних комах, які здатні ефективно знаходити найкоротші шляхи до джерел їжі при колективній взаємодії. Важливу роль в цьому процесі має позначення найкоротших маршрутів спеціальною речовиною – феромоном, концентрація якої впливає на вибір шляху іншими агентами (мурахами). В процесі формування рішення, агент прокладає шлях по переходах між вершинами, ймовірність вибору яких у класичному варіанті визначається як

$$p_{ij} = \frac{t_{ij}^\alpha + \frac{1}{w_{ij}^\beta}}{\sum_{l \in S_i} (t_{il}^\alpha + \frac{1}{w_{il}^\beta})}, \quad (6)$$

де i – поточна вершина, в якій розташований агент, j – вершина, що розглядається для вибору, S_i – множина доступних для вибору вершин, t – кількість феромону на переході, w – довжина переходу, α та β – регульовані параметри, що при виборі переходу визначаються пріоритетність феромону чи вартості переходу відповідно.

Враховуючи здатність феромону до випаровування, кількість речовини після проходження однією комахою залишається вищою на більш коротких шляхах, що зумовлює поступове виділення найкоротших шляхів більшістю особин колонії [14].

Дослідження спирається на реалізації МА на основі таких підходів, як алгоритм Ant System [15] і

виділення класу елітарних агентів для закріплення найкращих шляхів [16]. Наявність пам'яті в кожного агента, яка зберігає інформацію про вершини, пройдені протягом однієї ітерації, дозволяє визначати ще не відвідані вершини, що задовольняє умовам (1-3) та дозволяє використовувати розроблену реалізацію МА для вирішення ЗК.

Розглянуто використання штучних нейронних мереж (ШНМ), як широко розповсюдженого засобу для вирішення задач, що оперують складними структурами даних [17–20]. Серед архітектур ШНМ для вирішення задачі на графах найбільш доцільним є використання самоорганізуючої карти Кохонена (Self-Organizing Map – SOM), що використовує підхід «навчання без вчителя» – налаштування мережі без використання тренувальних даних, направлене на виявлення неочевидних взаємозв'язків та закономірностей даних [21].

При реалізації алгоритму побудови SOM, вжито ряд заходів, направлених на його адаптацію до вирішення ЗК. Топологія мережі обрана у вигляді замкнутого кільця, згідно якої кожен нейрон має зв'язок тільки з двома сусідніми [22]. Пошук зупиняється, коли кожна вершина буде мати принаймні один асоційований нейрон мережі. Таким нейроном вважається той, що є певною мірою наближений до вершини (відстань не перевищує вказаний поріг). При цьому, кожен нейрон не може бути асоційований більш ніж з одною вершиною ЗК. Якщо нейрон вже є наближеним до вершини, він виключається із процесу пошуку ВМУ (Best Matching Unit – найближчий нейрон до вектору даних, що розглядається протягом поточної ітерації), а вершина, відповідно, виключається з перебору в наступних ітераціях.

В якості функції сусідства, що визначає порядок зсуву нейронів залежно від їх розташування відносно ВМУ, обрана функція Гауса наступного вигляду:

$$h_{i,BMU} = e^{\frac{-D(\bar{n}_i, \bar{n}_{BMU})^2 * L(\bar{n}_i, \bar{n}_{BMU})}{\sigma}}, \quad (7)$$

де $L(\bar{n}_i, \bar{n}_{BMU})$ – евклідова відстань від нейрону \bar{n}_i до ВМУ, а $D(\bar{n}_i, \bar{n}_{BMU})$ – відстань між цими нейронами, що виражається в кількості переходів між ними по мережі. Використання відстані D дозволяє враховувати топологію мережі та при переміщенні нейронів віддавати більшу перевагу тим вузлам, що знаходяться ближче до ВМУ по порядку слідування в мережі, а не лише за відстанню на площині. Параметр σ визначає «еластичність» мережі – його значення прямо пропорційно впливає на кількість сусідніх з ВМУ нейронів, що змінять своє положення, і на відстань їх зсуву. В ході роботи алгоритму σ зменшується із темпами, які задаються окремим параметром $\Delta\sigma$, поступово зменшуючи значення функції сусідства, і роблячи кожну наступну зміну в мережі більш локальною. Після обчислення функції Гауса, відбувається зсув нейронів в бік поточної вершини, що описується як

$$\bar{n}_i' = \bar{n}_i + \mu h_{i,BMU} (\bar{x} - \bar{n}_i), \quad (8)$$

де \bar{n}_i – нейрон, що переміщується, \bar{x} – вершина, в бік якої відбувається зміщення, $\mu \in (0;1]$ – коефіцієнт навчання, що вповільнює збіжність алгоритму, забезпечуючи точніші рішення.

На останніх ітераціях алгоритму роботи ШНМ, коли локальність змін є максимальною (відбувається пересування переважно тільки ВМУ), може виникнути явище, яке має негативний вплив на остаточний результат. Якщо один і той же нейрон обирається як ВМУ для двох чи більше вершин ЗК, його наближення до однієї вершини частково компенсується переміщенням в бік іншої, що призводить до уповільнення процесу асоціації. Для запобігання цьому явищу, вибір найближчого до вершини нейрона визначено як:

$$\bar{n}_j : L(\bar{n}_j, \bar{d}_i) * p_j \rightarrow \min, \quad (9)$$

де p_j є штрафним коефіцієнтом, що має завадити занадто частому вибору нейрону як найближчого та прискорити пересування в бік однієї вершини. Початкове значення коефіцієнту дорівнює 1 для всіх нейронів, і після кожного вибору елемента як ВМУ, його штрафний коефіцієнт збільшується на значення, що задається окремим параметром Δp .

Оскільки розподілення вершин ЗК у графі не є рівномірним, в процесі формування карти можуть залишатися нейрони, чиї всі сусіди вже асоційовані з вершинами, але які не мають поблизу доступних вершин для асоціації з ними. Алгоритм роботи карти Кохонена буде рухати такі нейрони до найближчих доступних вершин, які можуть знаходитися на віддаленій ділянці простору графу ЗК, що породжує відгалуження на фрагментах маршруту (рис. 2), які роблять кінцевий шлях обходу графа значно довшим.

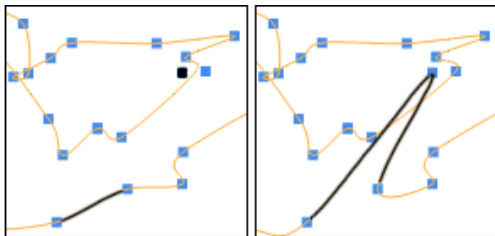


Рис. 2. Поява відгалужень при нерівномірному розподіленні точок мережі

З метою уникнення появи відгалужень вирішено формувати мережу зі збільшеною кількістю нейронів. Після виконання умови зупини, для отримання остаточного маршруту, нейрони, які не мають асоційованих вершин ЗК, видаляються з мережі. Доцільне значення коефіцієнта збільшення кількості нейронів N визначається експериментально для конкретного графа.

Результати експериментальних досліджень

Для проведення експериментів обрані графи tsb225, pcb442 та pr1002 (кількість вершин відповідає номеру у назві) з бібліотеки TSPLIB.

Дослідження використання ГА починаються з перевірки темпів збіжності алгоритму для різних

комбінацій генетичних операторів, із задіянням методів ініціалізації параметрів, що включають генерацію випадкових значень (One Time – «ОТ», Every Generation – «ЕГ», Every Individual – «ЕІ»).

Оскільки оператор мутації покликаний підвищувати різноманіття генотипу та зменшувати темпи збіжності, вирішено не використовувати його в даній серії експериментів, встановивши ймовірність мутації на 0.

Розмір популяції складає 250 особин, умовою зупини обрано досягнення коефіцієнтом виродження D величини 0,8, із максимально можливою кількістю поколінь 5000. Експерименти проведені для обох варіантів розрахунку показника виродження популяції (4-5).

В ході серії експериментів проведених для графа pr1002 (табл. 1), виявлено, що найменшу схильність до передчасної збіжності забезпечує кросовер Inver-over (IO) із методом ініціалізації початкових параметрів «ЕІ», який має приблизно однакові показники для обох варіантів розрахунку показника виродження D при використанні обох методів відбору – турнірної селекції (Т) та рулеткою (Р).

Таблиця 1 – Збіжність різновидів ГА

| № п/п | Кросовер | Селекція | Ініціалізація | Кільк. ітерацій | Виродження |
|-----------------------|----------|----------|---------------|-----------------|------------|
| Лінійна функція D | | | | | |
| 1 | IO | Т | ЕІ | 5000 | 0,0120 |
| 2 | IO | Р | ЕІ | 5000 | 0,0201 |
| 3 | IO | Т | ЕГ | 5000 | 0,0375 |
| 4 | IO | Р | ЕГ | 5000 | 0,0924 |
| 5 | OBX | Т | ЕІ | 2536 | 0,8393 |
| 6 | OBX | Т | ЕГ | 2306 | 0,8755 |
| 7 | IO | Т | ОТ | 434 | 0,8568 |
| Квадратична функція D | | | | | |
| 1 | IO | Р | ЕІ | 5000 | 0,0186 |
| 2 | IO | Т | ЕІ | 5000 | 0,0343 |
| 3 | IO | Р | ЕГ | 5000 | 0,0396 |
| 4 | IO | Т | ЕГ | 5000 | 0,1505 |
| 5 | OBX | Р | ЕІ | 2548 | 0,9050 |
| 6 | OBX | Т | ЕГ | 2181 | 0,9048 |
| 7 | IO | Р | ОТ | 597 | 0,8318 |

Наступним етапом дослідження є порівняння швидкості роботи алгоритму та довжин знайдених маршрутів. З цією метою, для всіх варіантів ГА встановлено єдину умову зупини – досягнення 500 поколінь. Згідно результатам експериментів (рис.3) найкоротші шляхи знаходяться при селекції методом рулетки та кросовері ОХ з ініціалізацією способом ЕІ (3880514 на графі pr1002), наступним за довжиною знайденого маршруту є результат при IO із тим же типом селекції та порядком задання параметрів (4028028).

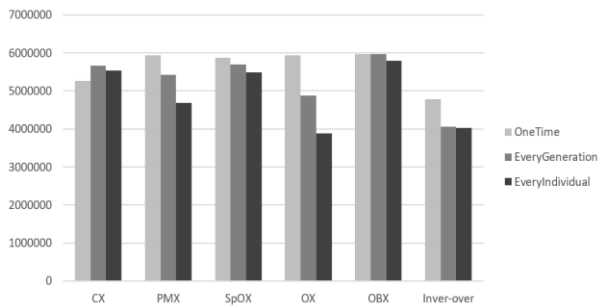


Рис. 3. Довжини маршрутів, знайдених ГА, для різних кросоверів та селекції методом рулетки

Але в той же час, конфігурація з кросовером ІО виявилася у 12 разів швидшою за варіант з ОХ (рис. 4) – 26 та 321 секунда відповідно, що зумовлює вибір цього варіанту генетичного алгоритму для подальших експериментів.

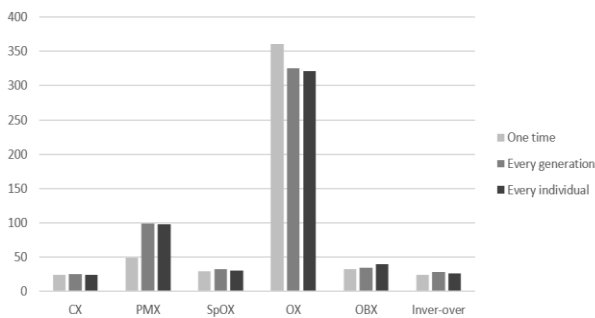


Рис. 4. Час роботи ГА для різних кросоверів та селекції методом рулетки

Проведені експерименти також показали, що обрана конфігурація (кросовер ІО, ініціалізація параметрів для кожної особи окремо на кожному поколінні, стратегія відбору рулеткою) відрізняється стійкістю до передчасної збіжності, що дає змогу не використовувати оператор мутації для підвищення різноманітності генотипу і дозволяє тим самим зменшити час роботи алгоритму.

Проведена серія експериментів, в ході якої визначався необхідний розмір популяції та число поколінь для отримання якомога коротших маршрутів за прийнятний час. Результати використання ГА для графів різного розміру представлені у зведених даних за усіма розглянутими методами у табл. 3.

При дослідженні мурашиного алгоритму, важливим аспектом є підбір параметрів α та β , тому дослідження роботи МА починаються з встановлення їх найкращого співвідношення. Початкові умови проведення експериментів: кількість агентів – 25, кількість одиниць феромону, що агент залишає на ділянці – 100, кількість ітерацій – 25, коефіцієнт випаровування – 50%, α змінюється від 0,5 до 5 з кроком 0,5, β – від 1 до 5 з кроком 1. Результати експерименту, представлені на рис. 5, показують, що кращі результати досягаються при α від 1,5 та вище, та β від 2 та вище. Найкоротший маршрут на графі pr1002 (365244) отриманий при $\alpha=2,5$ та $\beta=5$. Згодом, цей результат було покращено (361885) при збільшенні кількості агентів та ітерацій до 35.

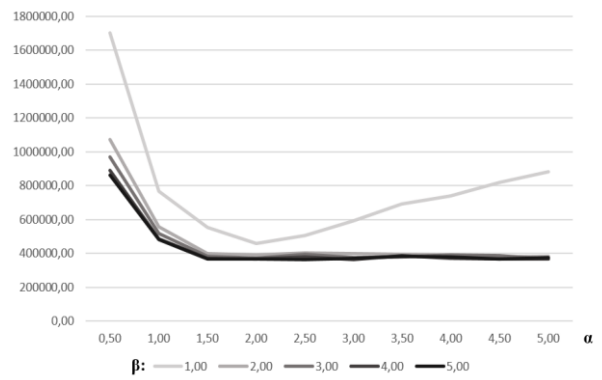


Рис. 5. Впливу параметрів α та β на довжину маршруту, знайденого мурашиним алгоритмом

Проведено дослідження доцільності застосування концепції елітних агентів. Частині агентів наданий відповідний клас, що обумовлює кількість феромону, що додається ними (змінюється від 125 до 350 одиниць). Згідно рис. 6, найкращий результат отримано при кількості феромону 225 одиниць. Надалі це значення використовувалося для отримання шляхів з мінімальною довжиною (табл. 3).

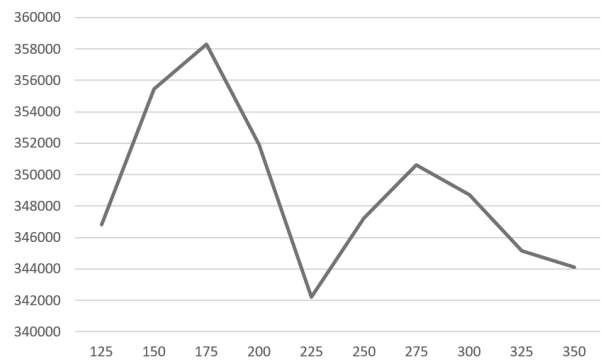


Рис. 6. Залежність довжини мінімального маршруту від кількості феромону, що залишають елітні агенти

При розгляданні самоорганізуючої карти Кохонена для пошуку найкоротших шляхів на графах, налаштування мережі необхідно проводити окремо для кожного з представлених графів. Не виявлено закономірності щодо отримуваного результату та значень вхідних параметрів мережі для графів різної розмірності. Суттєвий вплив на довжину знайденого маршруту обходу на графі pr1002 помічено для штрафного коефіцієнту Δp (рис. 7).

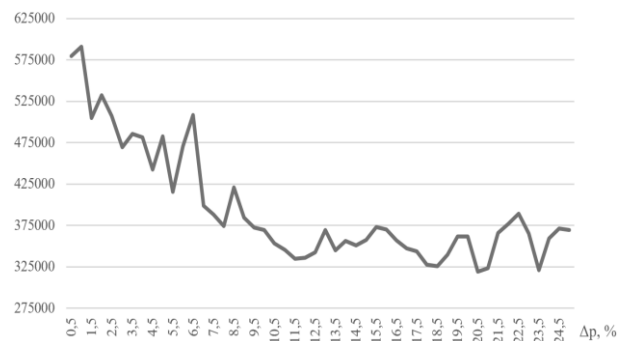


Рис. 7. Залежність довжини маршруту від значення штрафного коефіцієнту

Після серій експериментів щодо підбору параметрів (Δp , множник розміру мережі N та коефіцієнт швидкості навчання μ), були визначені їх значення для отримання найкращих результатів, представлених в табл. 2.

Таблиця 2 – Значення параметрів Δp , N , μ для обраних досліджень графів

| Граф | Δp , % | μ , % |
|--------|----------------|-----------|
| tsp225 | 18 | 35 |
| pcb442 | 7,5 | 35 |
| pr1002 | 20,5 | 60 |

Значення інших параметрів роботи штучної нейронної мережі для пошуку найкоротшого шляху обходу графу обрані наступні: множник розміру мережі дорівнює 3, еластичність мережі $\sigma = N2$, де N – кількість вершин на графі, темп зменшення еластичності мережі $\Delta\sigma$ дорівнює 0,1%.

В табл. 3 представлені зведені результати досліджень для всіх розглянутих алгоритмів та трьох графів ЗК, де L_{best} – довжина відомого найкращого маршруту, що надається авторами TSPLIB, L позначає довжину найкоротшого шляху, знайденого відповідним підходом, t – загальний час роботи алгоритму в секундах.

Таблиця 3 – Зведені результати пошуку найкоротших шляхів методами на основі підходів машинного навчання

| Граф | L_{best} | ГА | | МА | | | | SOM | |
|--------|------------|--------|------|------------|------|-------------------|------|--------|------|
| | | L | t, c | Ant System | | Elitist Algorithm | | L | t, c |
| | | | | L | t, c | L | t, c | | |
| tsp225 | 3919 | 4252 | 9 | 4968 | 8 | 4754 | 6 | 5514 | 3 |
| pcb442 | 50778 | 58076 | 68 | 66595 | 32 | 66646 | 23 | 60681 | 8 |
| pr1002 | 259045 | 475204 | 194 | 361885 | 144 | 349750 | 127 | 309255 | 24 |

Результати дослідження, зібрані в табл. 3, показали, що найкращі результати для графів розміром у 225 та 442 вершини забезпечує генетичний алгоритм (4252 та 58076 відповідно), але довжина знайденого шляху для графу на 1002 вершини поступається результатам роботи МА та карті Кохонена, причому найкращий результат має ШНМ – 309255 при відомій оптимальній довжині в 259045.

Виявлено, що карта Кохонена дозволяє знайти наближені рішення значно швидше за інші розглянуті алгоритми, при чому ця різниця зростає із збільшенням кількості вершин графу – SOM швидший за інші алгоритми у 2-3 рази для задачі на 225 вершин, у 3-8 разів для 442 та у 5-7 разів для 1002 вершин. Подібне спостереження дозволяє зробити висновок про доцільність використання даного алгоритму для вирішення ЗК високих розмірностей.

Висновки

В даній роботі розглянуті підходи до вирішення задачі комівояжера з використанням методів обчислювального інтелекту, такі як генетичний алгоритм, мурашиний алгоритм та штучна нейронна мережа на прикладі самоорганізуючої карти Кохонена. Найбільшу точність рішень для задач розмірністю у 225 та 442 вершини показав генетичний алгоритм, а для задачі на 1002 міста найкоротший шлях був знайдений за допомогою ШНМ.

Також мережа Кохонена виявилася найшвидшим методом пошуку наближених рішень, що має важливе значення при практичному використанні задачі комівояжера.

Проведений аналіз збіжності генетичного алгоритму при використанні різних реалізацій генетичних операторів та способів їх налаштувань, найкращі результати отримано для конфігурації із кросовером типу Inver-Over, та методом ініціалізації його параметрів, що включає встановлення нових випадкових значень для кожної особи популяції на кожному поколінні.

Для подальших досліджень рішення ЗК на основі підходів машинного навчання є доцільним розгляд наступних питань:

- пошук швидких автоматизованих методів підбору початкових значень параметрів для самоорганізуючих карт Кохонена;
- можливість використання інших архітектур ШНМ для вирішення ЗК;
- аналіз більшої кількості існуючих та розробка нових модифікацій мурашиного алгоритму;
- дослідження нових реалізацій генетичних операторів для ГА.

Проведені дослідження показують ефективність використання підходів на основі засобів машинного навчання для знаходження прийнятних маршрутів обходу графів за короткий час.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Davendra D. (2010), "Travelling Salesman Problem, Theory and Applications", InTech, P. 338, ISBN 978-953-307-426-9
2. Dahiya C., Sangwan S. (2018), "Literature Review on Travelling Salesman Problem", International Journal of Research, Vol. 5(16), pp. 1152-1155, e-ISSN: 2348-6848, p-ISSN: 2348-795X
3. Toaza B, Esztergár-Kiss D. (2023), "A review of metaheuristic algorithms for solving TSP-based scheduling optimization problems", Applied Soft Computing, Vol. 148, pp. 1-24, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110908>
4. Crişan G. C., Iantovics L. B., Nechita E. (2019), "Computational Intelligence for Solving Difficult Transportation Problems", Procedia Computer Science, Vol. 159, pp. 172-181, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.172>
5. Eskandari S., Rafsanjani M. K. (2023), "Two new selection methods and their effects on the performance of genetic algorithm

- in solving supply chain and travelling salesman problems”, International Journal of Bio-Inspired Computation (IJBIC), Vol. 22(3), pp. 176-184, doi: <https://doi.org/10.1504/IJBIC.2023.135464>
6. Іващенко Г. С., Склярів А. С., Барковська О. Ю. (2023), “Гібридний метод рішення задачі маршрутизації транспорту з урахуванням додаткових обмежень”, Системи управління, навігації та зв'язку, №1, с. 75-79, doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.075>
 7. Wang, Y., Han, Z. (2021), “Ant colony optimization for traveling salesman problem based on parameters optimization”, Applied Soft Computing, Vol. 107, pp. 1-11, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107439>
 8. Zhang J., Feng X., Zhou B., Ren D. (2012), “An overall-regional competitive self-organizing map neural network for the Euclidean traveling salesman problem”, Neurocomputing, Vol. 89, pp. 1-11, doi: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2011.11.024>
 9. Shafie M. F., Ahmad F., Osman M. K., Ismail A.P., Ahmad K. A., Yahaya S. Z. (2023), “Optimization of Saleman Travelling Problem Using Genetic Algorithm with Combination of Order and Random Crossover”, 2023 IEEE 13th International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), pp. 255-258, doi: <https://doi.org/10.1109/ICCSCE58721.2023.10237137>
 10. Deep K., Mebrahtu H. (2012), “Variant of partially mapped crossover for the Travelling Salesman problems”, International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics, Vol. 3(1), pp. 47-69, ISSN: 2007-1558
 11. OuYang Q., Xu H. (2015), “The study of comparisons of three crossover operators in genetic algorithm for solving single machine scheduling problem”, International Conference on Manufacturing Science and Engineering (ICMSE 2015), Atlantis Press, pp. 293-297, doi: <https://doi.org/10.2991/icmse-15.2015.55>
 12. Kumar R., Memoria M., Thapliyal M., Kirola M., Ahmad I., Gupta A., Tyagi S., Ansari N. (2022), “Analyzing The Performance Of Crossover Operators (OX, OBX, PBX, MPX) To Solve Combinatorial Problems”, 2022 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COM-IT-CON), pp. 817-821, doi: <https://doi.org/10.1109/COM-IT-CON54601.2022.9850689>
 13. Singh D. R., Singh M. K., Singh T. (2016), “A Hybrid Algorithm with Modified Inver-Over Operator and Genetic Algorithm Search for Traveling Salesman Problem”, Advanced Computing and Communication Technologies, pp. 141-150, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-10-1023-1_14
 14. Chopard B., Tomassini M. (2018), “The Ant Colony Method”, An Introduction to Metaheuristics for Optimisation, pp. 81-96, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93073-2_5
 15. Colomi A., Dorigo M., Maniezzo V. (1991), “Distributed Optimization by Ant Colonies”, Proceedings of ECAL91 – European Conference on Artificial Life, Elsevier Publishing, pp. 134-142
 16. Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A. (1996), “The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), Vol. 26(1), pp. 29-41, doi: <https://doi.org/10.1109/3477.484436>
 17. Yaloveha, V., Hlavcheva, D., Podorozhniak, A. and Kuchuk, H. (2019), “Fire hazard research of forest areas based on the use of convolutional and capsule neural networks”, 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019 – Proceedings, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879867>
 18. Yaloveha, V., Hlavcheva, D. and Podorozhniak, A. (2019), “Usage of convolutional neural network for multispectral image processing applied to the problem of detecting fire hazardous forest areas”, *Сучасні інформаційні системи*, Vol. 3, No 1, pp. 116–120, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.1.19>
 19. Datsenko, S., and Kuchuk, H. (2023), “Biometric authentication utilizing convolutional neural networks”, Advanced Information Systems, vol. 7, no. 2, pp. 67–73. Doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.10>
 20. Yaloveha, V., Podorozhniak, A., Kuchuk, H. (2022), “Convolutional neural network hyperparameter optimization applied to land cover classification”, *Radioelectronic and Computer Systems*, No. 1(2022), pp. 115–128, DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2022.1.09>
 21. Sarikiyriakidis S., Goulianas K., Margaris A. I. (2023), “Using Self-organizing Maps to Solve the Travelling Salesman Problem: A Review”, WSEAS transactions on systems, Vol. 22, pp. 131-159, doi: <https://doi.org/10.37394/23202.2023.22.14>
 22. Faigl J., Hollinger, G. A. (2018), “Autonomous Data Collection Using a Self-Organizing Map”, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, Vol. 29(5), pp. 1703-1715, doi: <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2017.2678482>

Received (Надійшла) 07.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.04.2024

Methods of solving the traveling salesman problem based on computational intelligence

Heorhii Ivashchenko, Oleksandr Onyshchenko, Maksym Bondarenko, Nikita Zdoryk

Abstract. Topicality. Today, the traveling salesman's problem remains actual, as the need to find the shortest routes is currently found in many areas of human activity. With the development of technologies and the increase in the complexity of production processes and logistics, the requirements for accuracy and speed of search are increasing, which makes it necessary to choose appropriate methods for solving this problem. **The goal of this work** is to study the effectiveness of algorithms for solving the traveling salesman problem based on computational intelligence methods. **The object of research** is the process of finding the shortest route in large-dimensional TSP. **The subject of research** is route search algorithms for the traveling salesman problem using methods of computational intelligence, in particular, the analysis of the convergence of genetic algorithms when using different types of genetic operators. **Results.** This paper examines the features of the application of computational intelligence methods for solving the salesman's problem, which involves the use of variations of genetic algorithms, ant algorithms and artificial neural networks, in particular, Kohonen's self-organizing map. The obtained results of the performed experimental studies allow to draw conclusions about the advantages and disadvantages of individual algorithms. **Conclusions.** The proposed algorithm based on an artificial neural network has the highest speed, as well as the highest accuracy when problem graph contains approximately 1000 vertices. For problems with a smaller number of vertices, the genetic algorithm provides more accurate results.

Keywords: traveling salesman problem, route, graph, genetic algorithm, crossover, mutation, selection, ant algorithm, artificial neural networks, Kohonen's self-organizing map

А. О. Каргін^{1,2}, Д. О. Гієвський², Д. Г. Олійник¹

¹ Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

² Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

БЕЗПЕРЕРВНЕ ПЛАНУВАННЯ І СИТУАЦІЙНЕ УПРАВЛІННЯ ЯК ЗАВДАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ЩО ВІДЧУВАЄ

Анотація. Мотивація. Незважаючи на значний прогрес у галузі створення Безлюдних Систем (БС), забезпечення необхідного рівня їх автономності залишається актуальним завданням. Важливу роль у його вирішенні відіграє штучний інтелект. Особливості безлюдних систем породили нову модель «Штучний інтелект що відчуває» (ШІВ), що підтримує автономність. **Метою даної роботи** є розробка алгоритму що підтримує модель безперервного планування і ситуаційного управління імплементовану у систему Goal-Directed Control ШІВ. **Предметом дослідження** є методи та моделі управління автономними мобільними роботами на підставі даних від різноманітних сенсорів. **Результати.** Особливістю задачі управління автономними мобільними роботами є те, що для прийняття рішення в режимі реального часу щодо поточних дій використовують стан виконання плану, поточну ситуацію та можливість виконання частини плану дій, що залишилася, для досягнення мети. Наведено структуру багаторівневої розподіленої системи нечітких правил управління у поєднанні з системою продукційних правил планування. Розглянуто модифікований механізм нечіткого висновку, який завдяки введенню фактора впевненості здатний обробляти як факти щодо стану оточення так і стану виконання плану. Наведено алгоритм безперервного планування й приклади контрольних розрахунків. **Висновок.** Показано, що модифікація традиційного механізму логічного виведення в нечітких логічних системах, по-перше, шляхом введення контекстної пам'яті, що містить контекстні факти, по-друге, уявлення стану фактів, як і значень вхідних змінних у вигляді нечітких факторів впевненості, дозволяє застосувати їх для управління БС та використовувати усі переваги нечіткого управління щодо обробки невизначеності. Розробка традиційної нечіткої системи, спрямованої на управління реалізацією плану дій для автономного робота з урахуванням вищезазначених умов, що характеризується значною кількістю вхідних числових змінних від датчиків, є нерозв'язним завданням. Запропонована модель, яка складається з компонентів двох типів систем нечітких систем з лінгвістичними змінними та нечітких продукційних систем з факторами впевненості долає перелічені проблеми та зберігає переваги традиційних нечітких систем у поводженні з невизначеністю. **Напрямок подальших досліджень.** Майбутні кроки можуть бути присвячені розвитку моделі та інструментарію для інших класів безлюдних систем.

Ключові слова: автономні інтелектуальні безлюдні системи, штучний інтелект що відчуває, безперервне планування, ситуаційне управління.

Вступ

При створенні нових поколінь безпілотних автомобілів [1], автономних транспортних засобів військового призначення [2] та інших автономних систем основна увага приділяється проблемі підвищення рівня їхньої автономності [3]. Промислові БС складаються з автоматичних ліній і верстатів з програмною системою ЧПУ, до яких підключені транспортні та роботизовані системи [4]. У залізничній галузі БС створюють на базі розумних поїздів [5]. Розрізняють три класи БС залежно від рівня автономності: програмовані автоматичні БС, інтелектуальні БС та Автономні Інтелектуальні БС (АІБС) [4, 6, 7]. Перший тип має обмеження: БС може працювати лише за програмою і не може адаптуватися до будь-яких змін навколишнього середовища. Другий тип має певні можливості сприйняття, прийняття рішень і контролю, і може пристосовуватися до змін у навколишньому середовищі. АІБС має високий рівень автономності, може автономно приймати рішення в широкому діапазоні невизначеності [8]. ШІ є важливим компонентом, який забезпечує такий рівень автономії.

Апаратні ресурси АІБС встановлюють основу для автономії, а інтелект, наданий технологіями ШІ, визначає рівень самостійності прийняття рішень у цій структурі. Для створення БС обговорюються три типи моделей штучного інтелекту, які підтримують

автономію БС – механічний, мислячий та ШІ що Відчуває (ШІВ) [7, 9]. Зараз ШІВ є актуальним для АІБС і обговорюються різні аспекти від соціальних наслідків до архітектурних проектів [8, 10].

Метою цієї роботи є розробка алгоритму що підтримує модель безперервного планування і ситуаційного управління, який є імплементованим у системі Goal-Directed Control ШІВ [11-13].

Основна частина

Проблема автономності АІБС на прикладі колісного роботу. Нехай місією АІБС буде повторюване перевезення певного вантажу роботом з позиції А на позицію В (рис.1). Для досягнення мети робот має подолати певні етапи, тобто досягти виконання локальних цілей. В даному випадку, локальні цілі АІБС можуть бути представлені певними етапами плану реалізації місії, тобто послідовністю станів системи «Оточення-АІБС», які система має виконати завдяки своїм діям. Наведемо приклад такої послідовності станів, що відображає план реалізації місії: «Завантаження АІБС на позиції В», «Переміщення АІБС на позицію 5», «Переміщення АІБС на позицію 3», «Переміщення АІБС на позицію А», «Розвантаження вантажу АІБС на позиції А», «Переміщення АІБС на позицію 1», «Переміщення АІБС на позицію 4», «Переміщення АІБС на позицію В» і далі повторити описаний процес завантаження та переміщення вантажу (рис. 1):

$$\begin{aligned} &\rightarrow A^{Load} \rightarrow 1^{Move} \rightarrow 4^{Move} \rightarrow 5^{Move} \rightarrow B^{Unload} \rightarrow 5^{Move} \\ &\rightarrow 4^{Move} \rightarrow 1^{Move} \rightarrow A^{Load} \rightarrow \end{aligned} \quad (1)$$

Варто зауважити, що процес досягнення кожної локальної цілі може бути підданий подальшій декомпозиції і бути представленим у формі більш деталізованого плану дій.

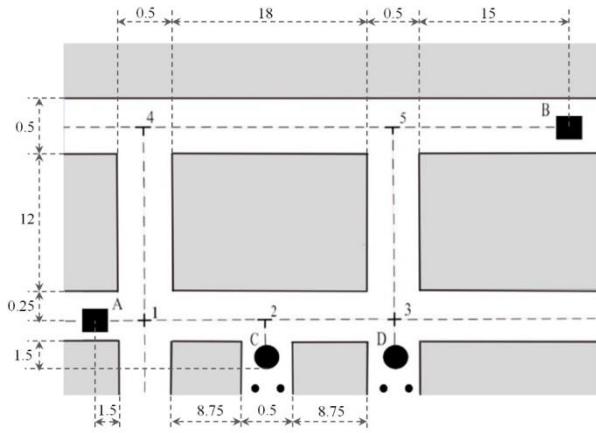


Рис. 1. Модель оточення АІБС

Також важливо враховувати, що сама місія являє собою не лише виконання переміщення між певними позиціями, але й включає в себе подолання перешкод. Через це план реалізації місії не є сталим, мусить включати в себе додаткові етапи, що допомагають долати перешкоди, перебудовувати за необхідності план, та сприяти досягненню кінцевої мети місії. Прикладами перешкод є пошкодження оточення, на яке спирається АІБС при виконанні місії (мітки, розмітка тощо), виникнення об'єкту на путі АІБС, що перешкоджає подальшому руху, або нестача заряду батареї, яка живить роботу.

Управління реалізацією плану дій у визначених умовах для досягнення кінцевої мети є завданням ШПВ, що розглядається в роботах [25, 26]. Однак відзначається головний недолік нечітких логічних систем для вирішення завдання ситуаційного управління поєднаного з безперервним плануванням. Це відсутність втримання контексту, через що немає розуміння в якому конкретно стані знаходиться система в визначений момент часу і які дії мають бути виконані на поточному кроці задля виконання місії. Довільний вибір траєкторії не сприяє виконанню плану дій, оскільки визначена планом послідовність станів системи потребує руху за певною заданою траєкторією. Визначене обмеження нечітких систем пропонується подолати шляхом імплементації контекстної залежності в множину незалежних нечітких правил БЗ [25], яка дозволяє додати в БЗ послідовність локальних цілей етапів плану, та при цьому зберегти незалежність правил одне від одного.

В статті розглядається реалізація запропонованої моделі та апробація нового алгоритму безперервного планування, який є імplementованим у системі Goal-Directed ШПВ.

Контекстно залежна модель управління що направляється ціллю. Реалізація контекстної залежності потребує певних змін у структурі нечіткої системи у тому числі фактів й правил. Для демонст-

рації прикладу використаємо визначений підхід [25]. Його реалізація потребує розділення множини фактів F на дві підмножини, де перша містить факти F^{plan} , на яких визначають етапи плану (локальні цілі), а друга – факти F^{sit} стосовно ситуації, в якій перебуває оточення АІБС.

$$F = \{F^{plan} = \{f_i, i=1,2,\dots,n\} = \{A^{Load}, B^{Unload}, 1^{Move}, 2^{Move}, 3^{Move}, 4^{Move}, 5^{Move}\}, F^{sit} = \{g_j, j=1,2,\dots,m\}\}. \quad (2)$$

Далі для збереження стадій виконання плану і їх відображення в поточний контекст введемо для кожного факту з F^{plan} (2) додатковий контекстний факт й помістимо їх в Контекстну Пам'ять (КП). Відповідно до кожного сенсорного факту f_i з (2) позначимо цей контекстний факт як $*f_i$. Таким чином, фактам за F^{plan} відповідатимуть наведені в КП контекстні факти з множини F .

$$F = \{ *A^{Load}, *B^{Load}, *1^{Move}, *2^{Move}, *3^{Move}, *4^{Move}, *5^{Move} \} \quad (3)$$

Стан Нечіткої Логічної Системи (НЛС) на довольному етапі реалізації плану визначає вектор CF значень Факторів Впевненості (ФВ) у базі фактів:

$$CF = (cf(f_i), cf(*f_i), i=1,2,\dots,n, cf(g_j), j=1,2,\dots,m). \quad (4)$$

Значення ФВ контекстних фактів оновлюється в результаті виконання правил НЛС шару управління реалізацією плану, що відслідковують контекст. Значення ФВ фактів, що є складовими підмножин F^{plan} та F^{sit} , визначаються на підставі даних, що надходять від сенсорів АІБС [27, 28].

Знання АІБС цієї досвід у вигляді фрагментів траєкторії поведінки, що призвела до досягнення мети при виконанні місії або усунення перешкод. Ці фрагменти являють собою, серед іншого, різні варіанти реалізації планів дій. Кожен фрагмент представляє структуру знань у вигляді рис. 2.

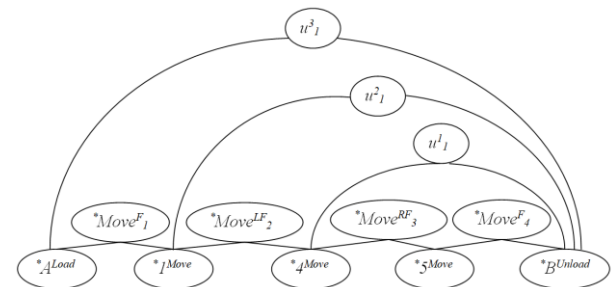


Рис. 2. Структура частини знань бази знань, що відповідає правилам R1-R7

На нижньому рівні структури це є елементарні знання що даються у формі «факт₁-дія-факт₂», які відображають, що за наявності факту₁ акт дії призводить до появи факту₂. Нижче в (5) та (6) наведено набір правил, які представляють фрагменти реалізації місії в оточенні (рис. 1), що потребується для завантаження грузу в точці А та розвантаженні в точці В. Структура відображає не тільки елементарні причинно-наслідкові зв'язки, а й стійкі більш тривалі ланцюги зв'язків. Наприклад, мета $*B^{Unload}$ досягається (можна отримати факт $*B^{Unload}$), якщо за наявності факту $*A^{Load}$ реалізується дія u^3_1 , яка є узагальненням послідовності дій $*Move^F_1$ і u^2_1 , де верхній індекс ви-

значає характер руху (F – рухатися прямо, LF – повернути наліво та рухатись прямо, RF – повернути направо та рухатись прямо), а нижній індекс є ідентифікаційним номером дії. Стосовно позначок дій високого рівня $u^n - l$ позначає рівень ієрархії правила, n – номер сценарію руху, що реалізується. Так само мета $*B^{Unload}$ досягається, якщо за наявності факту $*I^{Move}$ реалізується дія $*u^2_1$, яка є узагальненням послідовності дій $*4^{Move}$ ТА u^1_1 . В свою чергу, u^1_1 є уособленням послідовності $*Move^{RF}_3$ та $*Move^F_4$. Ці знання представлені в Базі Знань (БЗ) правилами R_5 , R_6 і R_7 , відповідно.

| | | | | | |
|----------|----------------|----------------|----|---------------|------------------|
| R1: ЯКЩО | $*A^{Load}$ ТА | $*Move^F_1$ | ТО | $*I^{Move}$ | ($cf=0.9$) |
| R2: ЯКЩО | $*I^{Move}$ ТА | $*Move^{LF}_2$ | ТО | $*4^{Move}$ | ($cf=0.9$) |
| R3: ЯКЩО | $*4^{Move}$ ТА | $*Move^{RF}_3$ | ТО | $*5^{Move}$ | ($cf=0.9$) |
| R4: ЯКЩО | $*5^{Move}$ ТА | $*Move^F_4$ | ТО | $*B^{Unload}$ | ($cf=0.9$) |
| R5: ЯКЩО | $*A^{Load}$ ТА | u^3_1 | ТО | $*B^{Unload}$ | ($cf=0.7$) |
| R6: ЯКЩО | $*I^{Move}$ ТА | u^2_1 | ТО | $*B^{Unload}$ | ($cf=0.75$) |
| R7: ЯКЩО | $*4^{Move}$ ТА | u^1_1 | ТО | $*B^{Unload}$ | ($cf=0.8$) (5) |

Оскільки рух реалізується за умови наявності перешкод, в якості прикладу, наведемо одну з них, що є нестачею заряду батареї робота. АІБС має вирушити до зарядної станції С або D, і лише потім повернутися до виконання плану.

| | | | | | |
|-----------|------------------|-------------------|----|---------------|------------------|
| R8: ЯКЩО | $*A^{Load}$ ТА | $*Move^F_1$ | ТО | $*I^{Move}$ | ($cf=0.9$) |
| R9: ЯКЩО | $*I^{Move}$ ТА | $*Move^F_5$ | ТО | $*2^{Move}$ | ($cf=0.9$) |
| R10: ЯКЩО | $*2^{Move}$ ТА | $*Move^{RF}_6$ | ТО | $*C^{Charge}$ | ($cf=0.9$) |
| R11: ЯКЩО | $*A^{Load}$ ТА | u^2_2 | ТО | $*C^{Charge}$ | ($cf=0.8$) |
| R12: ЯКЩО | $*I^{Move}$ ТА | u^2_2 | ТО | $*C^{Charge}$ | ($cf=0.85$) |
| R13: ЯКЩО | $*A^{Load}$ ТА | $*Move^F_1$ | ТО | $*I^{Move}$ | ($cf=0.9$) |
| R14: ЯКЩО | $*I^{Move}$ ТА | $*Move^F_5$ | ТО | $*2^{Move}$ | ($cf=0.9$) |
| R15: ЯКЩО | $*2^{Move}$ ТА | $*Move^F_7$ | ТО | $*3^{Move}$ | ($cf=0.9$) |
| R16: ЯКЩО | $*3^{Move}$ ТА | $*Move^{RF}_8$ | ТО | $*D^{Charge}$ | ($cf=0.9$) |
| R17: ЯКЩО | $*A^{Load}$ ТА | u^3_3 | ТО | $*D^{Charge}$ | ($cf=0.7$) |
| R18: ЯКЩО | $*I^{Move}$ ТА | u^2_3 | ТО | $*D^{Charge}$ | ($cf=0.75$) |
| R19: ЯКЩО | $*2^{Move}$ ТА | u^1_3 | ТО | $*D^{Charge}$ | ($cf=0.85$) |
| R20: ЯКЩО | $*C^{Charge}$ ТА | $*Move^F_2$ | ТО | $*2^{Move}$ | ($cf=0.9$) |
| R21: ЯКЩО | $*2^{Move}$ ТА | $*Move^F_7$ | ТО | $*3^{Move}$ | ($cf=0.9$) |
| R22: ЯКЩО | $*3^{Move}$ ТА | $*Move^{LF}_9$ | ТО | $*5^{Move}$ | ($cf=0.9$) |
| R23: ЯКЩО | $*5^{Move}$ ТА | $*Move^{RF}_{10}$ | ТО | $*B^{Unload}$ | ($cf=0.9$) |
| R24: ЯКЩО | $*C^{Charge}$ ТА | u^3_4 | ТО | $*B^{Unload}$ | ($cf=0.75$) |
| R25: ЯКЩО | $*2^{Move}$ ТА | u^2_4 | ТО | $*B^{Unload}$ | ($cf=0.8$) |
| R26: ЯКЩО | $*3^{Move}$ ТА | u^1_4 | ТО | $*B^{Unload}$ | ($cf=0.85$) |
| R27: ЯКЩО | $*D^{Charge}$ ТА | $*Move^F_{11}$ | ТО | $*3^{Move}$ | ($cf=0.9$) |
| R28: ЯКЩО | $*3^{Move}$ ТА | $*Move^F_{12}$ | ТО | $*5^{Move}$ | ($cf=0.9$) |
| R29: ЯКЩО | $*5^{Move}$ ТА | $*Move^{RF}_9$ | ТО | $*B^{Unload}$ | ($cf=0.9$) |
| R30: ЯКЩО | $*D^{Charge}$ ТА | u^2_5 | ТО | $*B^{Unload}$ | ($cf=0.75$) |
| R31: ЯКЩО | $*3^{Move}$ ТА | u^1_5 | ТО | $*B^{Unload}$ | ($cf=0.8$) (6) |

У випадку жорсткої нестачі енергії обирається маршрут 2, за яким АІБС рухається до точки С для виконання зарядки з виконанням узагальнюючих дій u^2_2 та u^2_1 (правила R_8 - R_{12}). Після активації зарядки далі може бути реалізований маршрут 4, за яким робот може досягти кінцевої дії $*B^{Unload}$ (правила R_{20} - R_{26}). Подібний сценарій також реалізовано для випадку помірної нестачі енергії, коли АІБС спочатку рухається до точки D для виконання зарядки, і вже потім до мети $*B^{Unload}$.

Goal-Directed механізм ШІВ реалізує нечітке логічне виведення з комбінацією методів прямого та зворотного ланцюгового висновку з ФВ. Прямий ланцюговий висновок використовує ФВ з бази фактів F^{plan} та F^{sit} а зворотній ланцюговий висновок ви-

користує факти з КП. Перед активацією механізму виведення ФВ фактів з F^{plan} та F^{sit} описують реальний стан середовища та етапів плану. Факти з КП відображають стани, що характеризують можливість реалізації дій, що ведуть до досягнення локальних цілей. Наприклад, $cf^{Re} = 0,9$ факту $*Move^F_4$ відображає можливість реалізації переходу від $*5^{Move}$ до $*B^{Unload}$. Інше значення $cf^{Re} = -0,9$ свідчить про неможливість досягнення локальної мети $*A^{UnLd}$ таким шляхом (правило R_4 в (5)). Ці значення змінюються відповідно до змін стану навколишнього середовища в реальному часі.

Алгоритм безперервного планування. Алгоритм представляє собою інтерпретацію методу зворотного виводу, який дозволяє отримати усі можливі шляхи розрахунку заданого цільового факту з розрахованими ФВ кожного знайденого шляху та отримати комбінований фактор впевненості (КФВ).

Алгоритм базується на використанні ідеї алгоритму пошуку в ширину та створенні дерева шляхів розрахунку цільового факту. Кожен вузол дерева представляє собою правило, яке необхідно розрахувати, щоб отримати цільовий факт або один з фактів, що необхідні для його розрахунку.

Структура дерева має стандартний вигляд: дерево має корінь, гілки, листя. Однак, структура вузла дерева була модифікована для можливості реалізації алгоритму.

Формальне визначення вузла дерева має вигляд:

$$\langle N, R_N, P_N, \{c_i: \forall c_i \in C_N\}, D_N, CF_N, \exists CF_B \leftrightarrow C_N \in \emptyset \rangle \quad (7)$$

де N є ідентифікатором вузла; R_N є ідентифікатором правила, за яким розраховується вузол N ; P_N є батьківським вузлом N ; C_N є множиною дочірніх вузлів N ; D_N є множиною залежностей, які необхідно мати для розрахунку вузла N за правилом R_N ; CF_N є поточним розрахованим ФВ вузла N ; CF_B є поточним розрахованим ФВ шляху (гілки дерева), до якої входить вузол N за умови, що вузол N є листям дерева.

Формальне визначення множини залежностей D_N вузла у (7) має вигляд:

$$\{ \langle f_j, \{T_{jk}\} \rangle : \forall f_j \in F_{RN} \} \quad (8)$$

де F_{RN} є множина необхідних фактів, що наявні у правилі R_N вузла N ; $\{T_{jk}\}$ є множиною кортежів зі структурою (9).

Формальне визначення кортежу T_f має вигляд:

$$\langle r, CF \rangle : r \in KB_f \quad (9)$$

де KB_f є множина правил для визначення факту f ; CF є поточним ФВ правила r .

Глобальні залежності (GD) є структурою, яка надає можливість відслідковувати вже знайдені правила, які необхідні для розрахунку кінцевої цілі, що прибирає необхідність повторного пошуку вже знайденого правила.

Формальне визначення структури GD має вигляд:

$$\{ \langle f_j, \{r_k: \forall r_k \in KB_f\} \rangle, \forall f_j \in F \} \quad (10)$$

де F є множиною всіх фактів, що використовуються у системі; KB_f є множина правил для визначення факту f .

Вхідними даними алгоритму є: БЗ, що містить у собі правила формату «ЯКЦО-ТО»; База Даних (БД), що містить відомі факти на момент початку використання алгоритму; цільовий факт (goal fact) – факт, для якого необхідно знайти шляхи його розрахунку.

Ідея алгоритму наступна: з черги отримується факт для пошуку відповідних правил для розрахунку. У випадку, коли отриманий факт – цільовий, створюється нове дерево шляхів розрахунку цільового факту, використовуючи знайдені правила як корені дерев. Інакше відбувається пошук вузлів дерев, які потребують отриманий факт для розрахунку, та їх доповнення знайденими правилами.

Після доповнення вузлів відбувається уточнення ФВ відповідних шляхів.

Шляхи розрахунку цільового факту отримуються із використанням листя дерев, за умови, що всі їх залежності були знайдені. Якщо хоча б до одної залежності не було знайдено відповідного правила, то шлях вважається недійсним й не бере участь у розрахунку КФВ.

Таким чином, результатом роботи даного алгоритму є:

1) множина шляхів для розрахунку цільового факту з розрахованим ФВ. Кожен шлях є впорядкованим списком правил, які необхідно послідовно розрахувати для отримання цільового факту, проте на момент завершення роботи алгоритму кожен шлях матиме розрахований ФВ цільового факту;

2) КФВ, який розраховано на основі ФВ кожного дійсного шляху.

В залежності від структури правил у БЗ розрахунок ФВ відбувається за (11) чи (12). В обох випадках КФВ розраховується за (13).

$$cf(H, E_1 \wedge E_2 \wedge \dots \wedge E_n) = \min[cf(E_1), cf(E_2), \dots, cf(E_n)] * cf \quad (11)$$

$$cf(H, E_1 \vee E_2 \vee \dots \vee E_n) = \max[cf(E_1), cf(E_2), \dots, cf(E_n)] * cf \quad (12)$$

де H є гіпотезою, або ж фактом, що розраховується; E_n є множина необхідних для розрахунку фактів; cf є базовим ФВ гіпотези H ; $cf(E_i)$ є ФВ факту E_i .

$$cf(cf_1, cf_2) = \begin{cases} cf_1 + cf_2 * (1 - cf_1) & cf_1 > 0 \text{ and } cf_2 > 0 \\ \frac{cf_1 + cf_2}{1 - \min[|cf_1|, |cf_2|]} & cf_1 < 0 \text{ or } cf_2 < 0 \\ cf_1 + cf_2 * (1 + cf_1) & cf_1 < 0 \text{ and } cf_2 < 0 \end{cases} \quad (13)$$

Алгоритм модифікованого зворотного виводу також використовує низку допоміжних алгоритмів-функцій.

До них входять наступні:

- GetLeaves,
- RestorePath,
- UpdateAncestors.

Рекурсивний алгоритм GetLeaves, використовуючи початковий вузол, повертає множину листків піддерева, де коренем є початковий вузол. Він використовується у випадках, коли необхідно до поточно-го вузла додати один або декілька нових одного рівня

(було знайдено декілька правил для розрахунку факту), проте поточний вузол може мати дочірні вузли. Тому, щоб зберегти коректні шляхи розрахунку цільового факту, необхідно додавати їх до листків піддерева.

Ідея алгоритму-функції наступна: рекурсивно переходити до дочірніх вузлів, доки S_N поточного вузла не дорівнюватиме порожній множині – це кінцева точка рекурсії.

Результатом є множина листків піддерева.

У момент знаходження правила для розрахунку поточного факту з черги, може трапитися ситуація, коли серед залежностей є ті правила, що вже було знайдено, тому, щоб уникнути повторного знаходження вже знайдених правил, було розроблено алгоритм-функцію RestorePath.

Цей рекурсивний алгоритм на вході отримує правило, з якого буде відбуватися відновлення шляхів. Відновлення відбуватиметься до тих пір, доки не відновиться правило, у якому всі залежності – дані з БД, або відповідні правила для необхідних фактів ще не були знайдені.

Ідея полягає у наступному: відбувається співставлення залежностей правила з GD. У разі, коли значення факту у GD є множина $\{0\}$, відбувається отримання його значення ФВ з БД. Інакше, коли значення множини відрізняється та не дорівнює порожній множині, відбувається відновлення кожного вузла з множини.

Результатом алгоритму-функції є оновлений вузол, з якого почалося відновлення шляху.

Після додавання нового вузла або відновлення шляху відбувається уточнення ФВ починаючи з листів піддерева.

Ідея полягає у наступному: через те, що кожен факт може мати декілька правил для розрахунку, використовується множина кортежів, що має структуру (9) для ідентифікації відповідного правила у залежностях вузла для оновлення. Починаючи з вузла-листя, відбувається поступовий перехід до батьківських вузлів оновлюючи їх залежності та доповнюючи множину кортежів.

Результатом є ФВ цільового факту використовуючи відповідний шлях розрахунку.

Висновки

Для дослідження можливостей нового напрямку штучного інтелекту, а саме штучний інтелект що відчуває, призначеного для підтримки автономності безлюдних систем, створюється модель ситуаційного управління поєднана з безперервним планування дій.

Показано, що модифікація традиційного механізму логічного виведення в нечітких логічних системах, по-перше, шляхом введення контекстної пам'яті, що містить контекстні факти відбиваючі стан виконання плану дії, по-друге, уявлення стану фактів, як і значень вхідних змінних у вигляді нечітких факторів впевненості, дозволяє застосувати їх для управління АІБС та використовувати усі переваги нечіткого управління щодо обробки невизначеності.

Розробка традиційної нечіткої системи, спрямованої на управління реалізацією плану дій для автономного робота з урахуванням вищезазначених умов, що характеризуються значною кількістю вхідних числових змінних від датчиків, є нерозв'язним завданням.

Запропонована модель, яка складається з компонентів двох типів нечітких систем з лінгвістичними змінними та фактами продукційних систем завдяки введенню факторів впевненості долає перелічені проблеми та зберігає переваги традиційних нечітких систем у поводженні з невизначеністю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. L. Joseph, A.K. Mondal, Eds, *Autonomous Driving and Advanced Driver-Assistance Systems (ADAS). Applications, Development, Legal Issues, and Testing*. 1st edn. CRC Press, Boca Raton, 2021, doi:10.1201/9781003048381.
2. "Sikorsky and DARPA's Autonomous Black Hawk Flies Logistics And Rescue Missions Without Pilots On Board," Lockheed Martin Corporation, 2022, USA, Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://news.lockheedmartin.com/2022-11-02-Sikorsky-and-DARPA-Autonomous-Black-Hawk-R-Flies-Logistics-and-Rescue-Missions-Without-Pilots-on-Board>
3. J. Deichmann et al., "Autonomous driving's future: Convenient and connected," McKinsey Center for Future Mobility. Report, Jan. 2023, Accessed: August 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.mckinsey.com/>
4. H. Chen et al., "From Automation System to Autonomous System: An Architecture Perspective," *J. of Marine Sci. and Eng.*, vol. 9, no. 6, Jun. 2021, doi: 10.3390/jmse9060645.
5. Rail Technical Strategy. *Innovating across Britain's railway*. Oct. 2022. Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://railtechnicalstrategy.co.uk/wp-content/uploads/2022/10/The-Rail-Technical-Strategy.pdf>
6. T. Zhang et al., "Current trends in the development of intelligent unmanned autonomous systems," *Frontiers Inf. Technol. Electron. Eng.*, vol. 18, Feb. 2017, pp. 68–85, doi: 10.1631/FITEE.1601650.
7. J. Reis, Y. Cohen, N. Melao, J. Costa, and D. Jorge, "High-Tech Defense Industries: Developing Autonomous Intelligent Systems," *Appl. Sci.*, vol. 11, 4920, 2021, doi: 10.3390/app11114920.
8. J. Chena, J. Sun, and G. Wang, "From Unmanned Systems to Autonomous Intelligent Systems," *Engineering*, vol.12, May 2022, pp. 16-19, doi: 10.1016/j.eng.2021.10.007.
9. M. Czerwinski, J. Hernandez, D. McDuff, "Building an AI that feels," *Appl. Sci.*, vol.11, 4920, Apr. 2021, doi: 10.3390/app11114920.
10. M. Huang and R. Rust, "Artificial Intelligence in Service," *J. of Service Res.*, vol. 21(2), Feb. 2018, pp.155-172, doi: 10.1177/1094670517752459.
11. A. Kargin, T. Petrenko, "Feeling Artificial Intelligence for AI-Enabled Autonomous Systems" in *Conf. Proc. of 2022 IEEE Global Conference on Artificial Intelligence and Internet of Things (GCAIoT) Alamein New City, Egypt, 18-21 December 2022*, P.88-93.
12. A. Kargin and T. Petrenko, "Spatio-Temporal Data Interpretation Based on Perceptual Model," in *Advances in Spatio-Temporal Segmentation of Visual Data. Studies in Computational Intelligence*, V. Mashtalir, I. Ruban, V. Levashenko, Eds., vol. 876, Springer, Cham, 2020, pp. 101-159.
13. A. Kargin and T. Petrenko, "Multi-level Computing With Words Model to Autonomous Systems Control," in *Proc. 9th Int. Conf. Inf. Control Sys.&Tech (ICST-2020)*, A. Pakštis, T. Hovorushchenko, V. Vychuzhanin, H. Yin, N. Rudnichenko. Eds. Odessa, Ukraine, Sep. 24–26, 2020, *CEUR Workshop Proceedings*, vol. 2711, pp. 16-30. [Online]. Available: <http://ceur-ws.org/Vol-2711/>

Received (Надійшла) 12.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.04.2024

Continuous planning and situational control as an Feeling Artificial Intelligence task

Anatolii Kargin, Dmytro Hiiivskiy, Dmytro Oliinyk

Abstract. Motivation Despite significant progress in the field of creating unmanned systems, ensuring the necessary level of their autonomy remains an urgent task. Artificial intelligence plays an important role in its solution. Features of unmanned systems have given rise to a new model of Feeling Artificial Intelligence (FAI) that supports autonomy. **The goal of this work** is to develop an algorithm that supports the model of continuous planning and situational control implemented in the Goal-Directed Control system of FAI. **The object of research** is the methods and models of controlling autonomous mobile robots based on data from various sensors. **Results.** The peculiarity of the task of autonomous mobile robots control is that they use the state of execution of the plan, the current situation and the possibility of executing the remaining part of the action plan to achieve the goal in order to make a decision in real time regarding the current actions. The structure of a multi-level distributed system of fuzzy rules in combination with a system of production planning rules is given. A modified mechanism of fuzzy inference is considered, which, thanks to the introduction of a certainty factor, is able to process both facts about the state of the environment and the state of plan execution. The continuous planning algorithm and examples of control calculations are given. **Conclusions.** It is shown that the modification of the traditional mechanism of logical reasoning in fuzzy logic systems, firstly, by introducing a context memory containing contextual facts, and secondly, the representation of the state of facts, as well as the values of the input variables in the form of fuzzy certainty factors, allows applying them for autonomous intelligence unmanned system control and take full advantage of fuzzy control in handling uncertainty. The development of a traditional fuzzy system aimed at managing the implementation of an action plan for an autonomous robot, taking into account the above conditions, characterized by a significant number of input numerical variables from sensors, is an intractable task. The proposed model, which consists of components of two types of systems, fuzzy systems with linguistic variables and fuzzy production systems with certainty factors, overcomes the listed problems and preserves the advantages of traditional fuzzy systems in dealing with uncertainty.

Keywords: Autonomous intelligent unmanned systems, Feeling Artificial Intelligence, continuous planning, situational control.

Г. К. Кожевніков, Д. С. Черниш, О. Ю. Матяш

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

ОНТОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ПЕРЕРОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Анотація. **Актуальність.** Все більшу популярність у різних галузях на сьогодні отримують системи Інтернету речей. При великій кількості кінцевих датчиків активно застосовується концепція туманних обчислень. Але використання туманної концепції у таких випадках потребує доволі частого перерозподілу навантаження між обчислювальними вузлами. **Мета статті** – розроблення підходу до скорочення часових витрат на перерозподіл навантаження за рахунок скорочення множини вузлів-кандидатів для розміщення навантаження і часу його формування на основі онтологічного аналізу з метою підвищення ефективності функціонування розподіленої системи, реалізованою на базі технології туманних обчислень. **Результати дослідження.** Проведено аналіз застосування онтологій для вирішення оптимізаційних завдань. Запропонований покроковий метод формування онтології розподілу обчислювального навантаження. Описаний підхід для формування системи продукційних правил вибору вузлів для перенесення навантаження Інтернету речей. Наведений приклад застосування розробленого підходу при виконання еволюційних алгоритмів, що використовуються для аналізу даних, які надходять з датчиків системи Інтернету речей. **Висновок.** Розроблений підхід скорочує часові витрати на перерозподіл навантаження за рахунок скорочення множини вузлів-кандидатів для розміщення навантаження і часу його формування на основі онтологічного аналізу з при використанні технології туманних обчислень.

Ключові слова: Інтернет речей, туманні обчислення, хмарна система, онтологія, продукційні правила.

Вступ

Четверта промислова революція (Industry 4.0) розглядається вченими як інтеграція сучасних концепцій розподілених обчислень, мережних технологій та промисловості [1]. Однією з майбутніх перспектив Industry 4.0 є об'єднання множини підприємств у глобальну промислову мережу речей та послуг [2]. Туманні обчислення в даний час є перспективною концепцією організації розподілених обчислень, які припускають наближення обробки даних до кінцевих пристроїв мереж і є розвитком популярної хмарної концепції [3]. Це дозволяє знизити навантаження на комунікативну мережу і скоротити час відгуку системи. На базі туманної концепції ефективно реалізуються різні розподілені системи, для яких швидкодія є найважливішим критерієм. Такі системи є вкрай затребуваними у багатьох областях людської діяльності, зокрема, у сучасних системах Інтернету речей, які мають високу та надвисоку щільність кінцевих датчиків [4–7]. Але використання туманної концепції у таких випадках потребує доволі частого перерозподілу навантаження між обчислювальними вузлами. Іноді часові витрати на перерозподіл навантаження зводять нанівець всі переваги, що надає додатковий туманний шар. Отже завдання скорочення часових витрат, пов'язаних з процесами реконфігурації системи розподілу навантаження Інтернету речей, є **актуальним**.

Мета роботи – розроблення підходу до скорочення часових витрат на перерозподіл навантаження за рахунок скорочення множини вузлів-кандидатів для розміщення навантаження і часу його формування на основі онтологічного аналізу з метою підвищення ефективності функціонування розподіленої системи, реалізованою на базі туманних обчислень.

Результати досліджень

1. Аналіз застосування онтологій для вирішення оптимізаційних завдань. На формальному

рівні онтологію можна розглядати як систему, що складається з набору понять та набору тверджень про ці поняття, на основі яких можна, можливо будувати класи, об'єкти, відносини, функції і теорії [8]. Під формальною моделлю онтології будемо розуміти:

$$O = \langle C, P, R, A \rangle, \quad (1)$$

де C – множина понять (класів сутностей) предметної області; P – множина властивостей цих понять (класів); R – множина зв'язків між поняттями (класами); A – множина аксіом, тверджень, побудованих з цих понять, їх властивостей і зв'язків між ними.

Таким чином, структура онтології містить наступні елементи: концепти (поняття, класи), атрибути, відносини, аксіоми, екземпляри. Під класом мається на увазі будь-яка сутність, про яку може бути надана будь-яка інформація. Примірники – одиничні сутності, що належать класам онтології. Одиниці онтології (класи та екземпляри) можуть мати властивості – атрибути. Атрибут описує внутрішні властивості об'єктів за допомогою конкретних значень. Кожен атрибут зазвичай має ім'я і значення, і використовується для зберігання інформації, яка специфічна для цієї одиниці.

Аксіоми (правила виводу) використовуються, щоб записати висловлювання, які завжди є істинними. Вони можуть бути включені в онтологію для різних цілей, наприклад, для визначення ком-плексних обмежень на значення атрибутів, для перевірки коректності інформації, що описані в онтології, або для виведення нової інформації. Аксіоми дозволяють висловити ту інформацію, яка не може бути відображена в онтології за допомогою побудови ієрархії понять і установки відносин між ними [9–15].

Аналіз сучасних джерел показав, що області застосування онтологій дуже різноманітні [16]. В даний час однією з найбільш перспективних областей застосування онтологій є проектування і моделювання, включаючи рішення оптимізаційних задач.

Наприклад, в роботі [17] пропонується використувати онтології для формального описи системи білінгу. При цьому використання онтологічного підходу дозволяє спростити комп'ютерну обробку даних, скоротити час обчислень і пошуку а також надає можливість логічного висновку.

У роботі [18] розглянуті питання, пов'язані з інтелектуалізацією процесу формування описи проєктованого виробу як складника проєктно-конструкторської документації в області проєктування нових моделей одягу. Передбачається, що використання онтологічного підходу дозволяє підвищити якість інженерних рішень.

У роботі [19] авторами використано онтологічний підхід до процесу підготовки та прийняття рішень щодо реалізації промислових інвестиційних проєктів. Онтологічні моделі забезпечують можливість вибору більше якісного рішення в відповідно з заданим критерієм оптимальності.

У роботі [20] запропоновано використовувати онтологічні моделі для рішення завдань управління групою інтелектуальних рухливих об'єктів (малорозмірних космічних апаратів) на прикладі рішення завдань дистанційного зондування Землі. Автори використовують ідею онтологічного опису об'єктів спостереження і правил розпізнавання цілі.

Таким чином, можна, можливо говорити о значному досвіді використання онтологій в рішенні оптимізаційних завдань, виникаючих в системах, заснованих на знаннях, в тому числі таких як:

- підтримка прийняття рішень при проєктуванні складних автоматизованих систем та процесів;
- управління процесами;
- моделювання і оцінка ситуацій;
- логічний висновок.

У поточному дослідженні пропонується використовувати онтологічні моделі при перерозподілі навантаження Інтернету речей.

2. Метод формування онтології розподілу обчислювального навантаження. Центральним компонентом методу формування обмежень при розподілі обчислювального навантаження між шарами системи є предметна онтологія, покладена в основу онтологічного аналізу. Метод формування моделі онтології розподілу обчислювального навантаження розроблений з урахуванням особливості алгоритмічних структур з точки зору обсягу та частоти інформаційних обмінів між процесами.

Отримана з допомогою даного методу модель є каркасом бази знань про предметну область, що розглядається – географічно розподілені системи Інтернету речей, функціонуючі на базі концепції туманних та хмарних обчислень. Розробка предметної онтології велася в програмному середовищі Protégé 5.0.

Розглянемо даний метод покроково.

Крок 1. Визначення класів онтології. Розроблювана онтологія включає наступні класи:

- модель розпаралелювання алгоритму;
- спосіб розбиття паралельного алгоритму в відповідно з обмеженнями на способи розбиття;
- вихідне розміщення: хмара, туман;
- регламентований час виконання алгоритму;

- параметри моделей розпаралелювання;
- вимоги до обчислювальних ресурсів.

Крок 2. Визначення таксономічної ієрархії класів. Створення класів онтології із встановленням ієрархічних зв'язків між поняттями ведеться в відповідно з множиною визначених концептів.

Крок 3. Визначення слотів. Для встановлення відносин між концептами онтології "Клас_алгоритму" і "Модель", створюємо властивість «має_модель», тим самим оголошуючи, що розглянуті класи мають моделі розпаралелювання. Аналогічно встановлюються відносини між класами "Модель" і "Спосіб_розбиття" через властивість "має_спосіб_розбиття"; "Острівна_модель" – "Тривалість_сезону" через властивість "має_параметр".

Крок 4. Визначення екземплярів класів. Заповнення класів онтології екземплярами відбувається відповідно з існуючими класифікаціями і проведеним аналізом. Наприклад, в термінах онтології маємо: клас онтології "Клас_алгоритму", який включає в себе відповідні підкласи еволюційних алгоритмів: "ГА" (генетичні алгоритми), "АНЖП" (алгоритми, натхненні живою природою), "АННП" (алгоритми, натхненні неживий природою). У свою чергу, кожен підклас може бути заповнений екземплярами. Наприклад, підклас «АНЖП» включає такі екземпляри: "бактеріальна оптимізація", "бур'яновий алгоритм", "Зозулин пошук", "мурашиний алгоритм".

З використанням методу формування моделі онтології отримується модель онтології розподілу обчислювального навантаження паралельних алгоритмів функціонування розподілених систем, яка структурує знання о класах паралельних алгоритмів, що використовуються в розподілених системах, моделях розпаралелювання алгоритмів, змінюваних параметрів даних моделей і способах їх розбиття, враховує вихідне розміщення обчислювальних вузлів, регламентований час виконання алгоритму і вимоги до обчислювальних ресурсів. Аспекти, відображені у онтології у вигляді системи ієрархії класів і відносин між ними, є ключовими в рішенні завдання розподілу навантаження Інтернету речей і здійснюють безпосередній вплив на ефективність функціонування системи.

3. Формування системи продукційних правил вибору вузлів для перенесення навантаження Інтернету речей. В основі етапу прийняття рішення про множину вузлів для перенесення обчислювального навантаження Інтернету речей лежить система продукційних правил, яка пов'язує клас онтології, що містить знання про підграф, що переноситься, комплексного функціонального завдання та способи його розбиття, а також потенційну множину вузлів для розміщення обчислювальної навантаження.

Продукційна модель має такий вигляд:

$$i = \langle S; L; A \rightarrow B; Q \rangle, \quad (2)$$

де S – клас ситуацій; $A \rightarrow B$ – умова, при якій продукція активізується; L – ядро продукції; Q – постумова продукційного правила.

Для перевірки запропонованого підходу було розроблено приклади продукційних правил.

Як правило, до розробки продукційних правил потрібно залучати експертів – людей, що є професіоналами високою кваліфікації в розглядаємі предметній області. Дані знання формуються з досвіду та суджень людей, які працюють у даної області, розуміють загальні принципи рішення її завдань, знають прийоми рішення, здатні забезпечити управління наближеними даними та дати оцінку часткових рішень. Слід відзначити, що запропонована система продукційних правил завжди може бути розширена.

Для розробки системи продукційних правил у розглядаємому випадку необхідно розробити правила для кожного способу розбиття підграфа обчислювальних завдань, згідно описаним обмеженням. Тому послідовно розглядаються можливі варіанти розбиття відповідно з існуючими моделями розпаралелювання. Запропоновані продукційні правила дозволяють прийняти рішення щодо вибору обчислювального вузла для перенесення навантаження на підставі знань, що містяться в моделі онтології розподілу обчислювальної навантаження паралельних алгоритмів функціонування розподілених систем.

4. Приклад застосування розробленого підходу. Проілюструємо ефективність способу скорочення часових витрат на основі онтологічного аналізу стосовно вирішення задачі розміщення обчислювальної навантаження при виконання еволюційних

алгоритмів, що використовуються для аналізу даних, які надходять з датчиків системи Інтернету речей.

Були розглянуті такі методи, як метод рою частинок та алгоритм бджол, причому розглядалися три різних типу генерації проміжних рішень. Була показана загальна для всіх еволюційних алгоритмів тенденція, що полягає в підвищення якості рішень із зростанням числа ітерацій (рис. 1, 2).

Також відзначимо наступне.

У залежності від розглянутого інтервалу приріст функції якості також змінюється. Наприклад, розглянемо залежність якості рішень від числа ітерацій в алгоритмі бджіл (рис. 2). Бачимо, що різкий приріст функції якості відзначається вже на інтервалі ітерацій, відповідному приблизно 1/10 від загальної числа ітерацій. Таким чином, ймовірність отримання задовільного по якості рішення висока вже на початкових ітераціях. Аналізуючи збільшення за якістю за рахунок залучення додаткової продуктивності, можна зробити висновок про те, що підхід, спрямований на скорочення часових витрат, пов'язаних з перенесенням обчислювальної навантаження, є перспективним рішенням підвищення якості рішень в оптимізаційних задачах аналізу даних Інтернету речей. Виконання додаткової роботи за рахунок пристроїв туманного шару дозволяє підвищити якість приймаємих рішень.

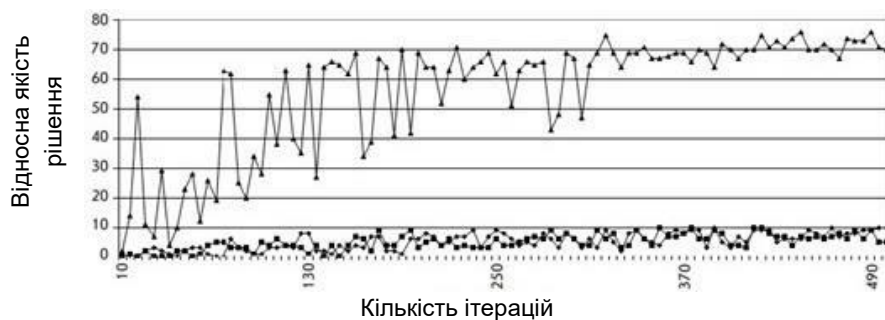


Рис. 1. Графік залежності якості рішень від кількості ітерацій для методу рою частинок

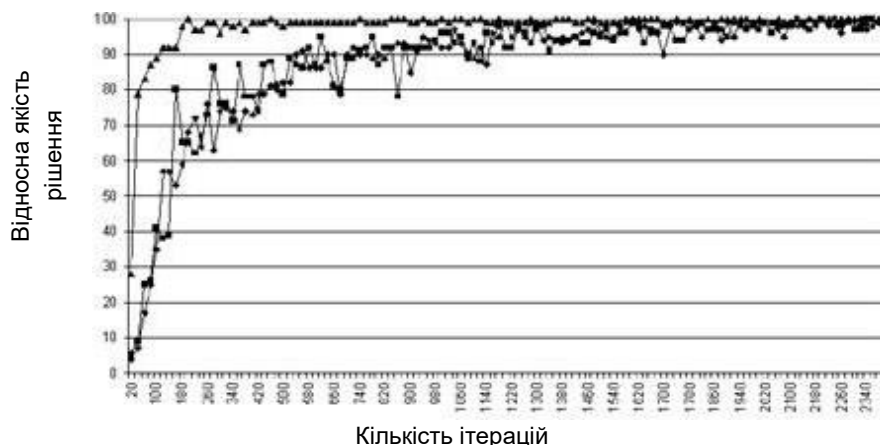


Рис. 2. Графік залежності якості рішень від кількості ітерацій для алгоритму бджіл

Висновки

В результаті проведених досліджень розроблений підхід до скорочення часових витрат на перерозподіл навантаження за рахунок скорочення множини

вузлів-кандидатів для розміщення навантаження і часу його формування на основі онтологічного аналізу з метою підвищення ефективності функціонування розподіленої системи, реалізованою на базі технології туманних обчислень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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>
2. 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>
3. 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>
4. 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>
5. 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
6. 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>
7. 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>
8. Mishra, A., Singh, P. (2024). A hybrid approach to ontology evaluation. *Mathematics and Computer Science*, vol. 2, pp. 187–204, doi: DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119896715.ch13>
9. Kuchuk, G., Nechausov, S., Kharchenko, V. (2015). Two-stage optimization of resource allocation for hybrid cloud data store. *International Conference on Information and Digital Technologies*, Zilina, pp. 266–271. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DT.2015.7222982>
10. 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>
11. 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
12. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
13. Nechausov A., Mamusuc L., Kuchuk N. Synthesis of the air pollution level control system on the basis of hyperconvergent infrastructures. *Сучасні інформаційні системи*. 2017. Т. 1, № 2. С. 21 – 26. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.04>
14. 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>
15. Qaswar, F., Rahmah, M., Raza, M.A., Hassan, M.K.A., Sharaf, A. (2023). Applications of Ontology in the Internet of Things: A Systematic Analysis. *Electronics (Switzerland)*, 12(1), 111, doi: <http://dx.doi.org/10.3390/electronics12010111>
16. Kalaiselvi, P., Michael Jones, M., Murugesu, 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>
17. 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>
18. Lee, C.-H.L., Liu, A. (2008). Applying fuzzy candlestick pattern ontology to investment knowledge management, *Journal of Internet Technology*, 9(4), pp. 307–315.
19. Li, Y., Ouyang, S., Zhang, Y. (2022). Combining deep learning and ontology reasoning for remote sensing image semantic segmentation, *Knowledge-Based Systems*, 243, 108469, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108469>
20. 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) 31.01.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.04.2024

Ontological approach to load distribution of the Internet of Things

H. Kozhevnikov, D. Chernysh, O. Matyash

Abstract. Topicality. Today, Internet of Things systems will gain more and more popularity in various industries. With a large number of finite sensors, the concept of fog computing is actively used. But the use of the fuzzy concept in such cases requires quite frequent redistribution of the load between computing nodes. **The purpose of the article** is to develop an approach to reducing time spent on load redistribution by reducing the number of candidate nodes for load placement and the time of its formation based on ontological analysis in order to increase the efficiency of the functioning of a distributed system implemented on the basis of fog computing technology. **Research results.** An analysis of the use of ontologies for solving optimization tasks was carried out. The proposed step-by-step method of forming the computing load distribution ontology. The approach for forming a system of production rules for selecting nodes for transferring the load of the Internet of Things is described. An example of the application of the developed approach in the implementation of evolutionary algorithms used to analyze data received from the sensors of the Internet of Things system is given. **Conclusion.** The developed approach reduces time spent on load redistribution by reducing the number of candidate nodes for load placement and the time of its formation based on ontological analysis with the use of fog computing technology.

Keywords: Internet of Things, fog computing, cloud system, ontology, production rules.

В. Г. Ладоня, Є. В. Мелешко, М. С. Якименко

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

РОЗРОБКА ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ВЕБСЕРВІСУ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ІНОЗЕМНОЇ МОВИ МЕТОДОМ ІНТЕРВАЛЬНИХ ПОВТОРЕНЬ

Анотація. Предметом дослідження у статті є методи побудови онлайн-системи для вивчення іноземної мови по методиці інтервальних повторень. Представлено результати розробки веб-сервісу для вивчення англійської мови. Інтервальні повторення є ефективною методикою для вивчення та запам'ятовування інформації. Ця методика ґрунтується на принципах когнітивної психології та полягає у систематичному повторенні матеріалу з певними інтервалами часу між повтореннями. Основною ідеєю інтервальних повторень є те, що інформація краще закріплюється у пам'яті, якщо користувач повторює її в точно визначені моменти часу, коли пам'ять починає слабшати, але ще не забувається повністю. Для розробки системи було використано мову програмування Kotlin і середовище розробки IntelliJ IDEA, а також фреймворк Spring Boot для створення основного каркасу системи, фреймворк Vaadin для створення веб-інтерфейсу користувача, базу даних H2 для зберігання усієї введеної інформації, фреймворк Hibernate як інтерфейс взаємодії з базою даних та інструмент збирання й автоматизації Gradle для компіляції і збирання системи й керування усіма версіями підключених бібліотек. Розроблена система має клієнт-серверну архітектуру. Клієнтська частина створює веб-інтерфейс для користувача та генерує запити до серверної частини, коли користувач взаємодіє з веб-інтерфейсом. Серверна частина містить веб-контролери та веб-сервіси, які обробляють HTTP-запити та взаємодіють з базою даних. Розроблена система надає наступний функціонал для реалізації інтервальних повторень: додавання флеш-карток, редагування флеш-карток, вивчення флеш-карток, статистика навчання, налаштування, вибір алгоритму повторення та керування профілем користувача. Розроблений веб-сервіс може бути використаний як додатковий ресурс у навчанні англійської мови в школах та університетах, полегшуючи процес вивчення іноземних слів або як інструмент для постійної практики та розширення словникового запасу для осіб що вивчають англійську мову самостійно.

Ключові слова: дистанційне навчання, інтервальні повторення, флеш-картки, вивчення іноземної мови, веб-сервіс, веб-програмування, інтелектуальна система, скриптові мови програмування, алгоритми, кіберпсихологія.

Вступ

Через стрімке збільшення попиту на дистанційне навчання в останні роки освітні онлайн-платформи почали займати основну частину ринку навчального програмного забезпечення. Вони дозволяють отримати доступ до необхідних навчальних матеріалів з будь-якого пристрою, з будь-якої точки світу, зберігати навчальний прогрес, та автоматично адаптувати навчальну програму під індивідуальні особливості кожного учня. Завдяки цьому, невелика кількість викладачів, які створюють та наповнюють навчальну програму, мають змогу навчити необмежену кількість учнів у найбільш ефективний спосіб. Саме автоматична адаптація навчального процесу під кожного учня з використанням алгоритмів та машинного навчання є одним з найбільш перспективних шляхів розвитку сучасної онлайн-освіти.

Оскільки навчальна програма з кожної галузі знань є унікальною, зі своєю особливою методикою викладання та подачі матеріалу, кожен такий алгоритм повинен бути адаптований під таку програму, аби мати змогу підвищити та покращити ефективність сприймання та засвоєння навчального матеріалу учнями. Адже викладання, наприклад, програмування має свої особливості та відмінності від викладання англійської мови. Через це, зазвичай, кожна онлайн-платформа має своє власне спрямування та адаптацію під конкретну спеціалізацію.

Одними з найпопулярніших платформ дистанційного навчання є онлайн-платформами вивчен-

ня іноземних мов [1] та насамперед англійської, як мови міжнародного спілкування. Оскільки для вивчення будь-якої мови необхідно активно поповнювати словниковий запас, для цього часто використовується техніка запам'ятовування з використанням навчальних флеш-карток [2] та періодичним переглядом їх й повторенням. Спочатку, це були звичайні картонні картки, які потрібно було вирізати, заповнювати, сортувати вручну. Проте сучасні онлайн-платформи перетворили їх у цифровий вигляд, що у комбінації з алгоритмами періодичного повторення значно підвищило ефективність та зручність використання [3, 4]. У роботах [5-8] показано високу ефективність методу інтервальних повторень при офлайн та онлайн навчанні.

Інтервальні повторення – це ефективний метод для вивчення та запам'ятовування інформації [9]. Ця методика ґрунтується на принципах *когнітивної психології* та полягає у систематичному повторенні матеріалу з певними інтервалами часу між повтореннями [10]. Основною ідеєю інтервальних повторень є те, що інформація краще закріплюється в пам'яті, якщо користувач повторює її в точно визначені моменти, коли пам'ять починає слабшати, але ще не забувається повністю [11, 12].

Методика інтервальних повторень передбачає поділ матеріалу на невеликі порції та розподілення їх у часі таким способом, щоб користувач повторював ці порції перед тим, як вони забудуться повністю. Зазвичай ці інтервали збільшуються з кожним наступним повторенням. Це означає, що користувач повторює інформацію через дедалі довші періоди часу, коли він усе ще пам'ятає її добре, і

зменшує інтервали, якщо він має труднощі в запам'ятовуванні.

Метою роботи є розробка та програмна реалізація веб-сервісу для вивчення англійської мови.

Для досягнення поставленої мети визначена програма дослідження, що складається з наступних завдань:

- Дослідження методики інтервальних повторень для вивчення іноземних мов.
- Розробка методів та алгоритмів для реалізації системи вивчення іноземних мов.
- Програмна реалізація веб-сервісу для вивчення англійської мови.

Основний матеріал

Методика інтервальних повторень (рис. 1) передбачає поділ матеріалу на невеликі порції та розподілення їх у часі таким способом, щоб користувач повторював ці порції перед тим, як вони забудуться повністю. Зазвичай ці інтервали збільшуються з кожним наступним повторенням. Це означає, що користувач повторює інформацію через дедалі довші періоди часу, коли він усе ще пам'ятає її добре, і зменшує інтервали, якщо він має труднощі в запам'ятовуванні.

Інтервальні повторення можна використовувати для вивчення різних видів інформації, включаючи словниковий запас, факти, формули та навіть навички [9]. Цей метод дуже ефективний для підготовки до іспитів, вивчення нового мовного матеріалу, а також для запам'ятовування та удосконалення навичок у різних галузях знань.

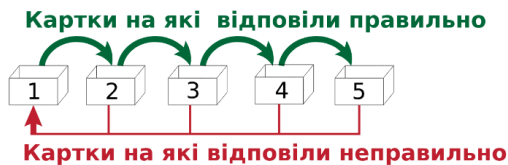


Рис. 1. Розподілення флеш-карток для інтервальних повторень

Важливим аспектом інтервальних повторень є систематичність. Дотримання правильного графіка повторень допомагає краще закріпити інформацію в пам'яті.

Ця методика дає змогу користувачу ефективно вивчати інформацію і заощаджувати час, оскільки він не витрачає його на надмірне повторення або незручні підходи до навчання.

Веб-сервіс для вивчення англійської мови за допомогою флеш-карток і методу інтервальних повторень пропонується розділити на декілька функціональних блоків, які дозволяють реалізувати загальний функціонал запропонованої системи:

1. Додавання флеш-карток:

- Ця функція дозволяє користувачам додавати нові флеш-картки до системи.
- Користувачі вводять текст питання та відповіді для кожної картки.
- Система зберігає ці дані в базі даних для подальшого вивчення.

Редагування флеш-карток:

- Дає змогу користувачам редагувати існуючі флеш-картки.
- Користувачі можуть змінювати текст питань та відповідей.
- Усі внесені зміни зберігаються в базі даних.

2. Вивчення флеш-карток:

- Використовує алгоритм повторення, який визначає, які флеш-картки виводити користувачам.
- Відображає флеш-картки користувачам, і вони повинні намагатися надати правильну відповідь.
- Відповіді користувачів аналізуються для визначення, коли кожну картку слід повторно показати користувачам.

3. Статистика навчання:

- Збирає, аналізує та відображає статистику навчання користувачів.
- Включає інформацію про те, скільки разів користувачі відповіли правильно або неправильно на питання, час вивчення кожної флеш-картки.
- Надає користувачам зворотний зв'язок про їхні досягнення та прогрес, допомагає аналізувати і покращувати навчальний процес.

4. Налаштування:

- Ця функція дозволяє користувачам налаштувати параметри системи під свої потреби.
- Налаштування включає в себе параметри повторення, режими навчання та інші налаштування.

5. Метод повторення:

- Визначає, коли і які флеш-картки повторно виводити користувачам для оптимального навчання.
- Алгоритм враховує історію відповідей користувача та розподіляє повторення відповідно до методу інтервальних повторень.

6. Керування профілем користувача:

- Реєстрація користувача в системі є початковою точкою для користувачів і гарантує, що їхні дані, налаштування та навчальний прогрес будуть збережені та доступні в системі.

Основними кроками алгоритму для програмної реалізації запропонованого методу дистанційного навчання англійської мови є:

1) Введення інформації – можливість користувача вводити інформацію, яку він бажає вивчити. Для вивчення англійської мови це є слова на англійській мові, їх переклади на українську мову та транскрипція.

2) Збереження інформації – введена інформація має зберігатися в базі даних, або іншій формі сховища. Для кожного навчального елемента, слід зберігати саму інформацію, дату останнього повторення та інтервал часу до наступного повторення.

3) Планування інтервалів повторень – алгоритм розраховує інтервали між повтореннями для кожного навчального елемента. Ці інтервали зазвичай починаються з короткого часу (наприклад, декілька годин) і збільшуються поступово з кожним наступним успішним повторенням. Новий інтервал може бути визначений на основі попереднього успіху користувача у відповіді на питання або залежно від рівня складності інформації.

4) Повторення інформації – програма надає користувачам можливість переглядати інформацію та відповідати на відповідні питання. Після кожного повторення користувача визначається, чи правильно була дана відповідь.

5) Оцінювання відповідей – програма оцінює правильність відповідей користувача і враховує цю інформацію для подальшого планування інтервалів повторень. Якщо користувач правильно відповів, інтервал можна збільшувати; якщо відповідь була невірною, інтервал потрібно зменшити.

6) Завершення циклу повторень – алгоритм повторюється для кожного навчального елемента доти, поки користувач не запам'ятає інформацію достатньо добре.

7) Аналіз та статистика – програма зберігає статистику щодо прогресу навчання користувача, таку як кількість вірних та неправильних відповідей.

8) Можливість налаштувань – програма надає користувачу можливість налаштувати параметри, такі як максимальний інтервал повторення, методика оцінювання відповідей, спосіб нагадування та інші.

Планування інтервалів повторень відбувається автоматично, за допомогою додаткового спеціалізованого алгоритму «планування повторень» і використовується для розрахунку оптимальних інтервалів між повтореннями конкретних навчальних елементів. Він враховує декілька ключових факторів, таких як:

1) Правильність відповіді. Якщо користувач правильно відповів на питання чи відтворив інформацію, інтервал повторення зазвичай збільшується.

2) Неправильність відповіді. Якщо користувач неправильно відповів, інтервал може залишитися незмінним, або навіть зменшитися.

3) Рівень складності матеріалу. Деякі навчальні елементи можуть бути складнішими за інші, і, відповідно, можуть потребувати коротших інтервалів між повтореннями.

4) Історія повторень. Алгоритм може враховувати історію повторень для кожного навчального елемента, щоб адаптувати інтервали на основі попередніх результатів.

5) Максимальний інтервал. Зазвичай є максимальний інтервал між повтореннями, після якого інформацію вважають вивченою.

6) Параметри налаштувань користувача. Алгоритм може враховувати параметри, налаштовані користувачем, такі як бажаний рівень впевненості перед наступним повторенням.

Для побудови системи було обрано такі засоби:

– мова програмування Kotlin та середовище розробки IntelliJ IDEA;

– фреймворк Spring Boot для створення основного каркасу системи;

– фреймворк Vaadin для створення веб-інтерфейсу користувача;

– База даних H2 для зберігання усієї введеної інформації;

– фреймворк Hibernate як інтерфейс взаємодії з базою даних;

– інструмент збирання та автоматизації Gradle для компіляції та збирання системи, керування усіма версіями підключених бібліотек.

Усі обрані засоби для побудови системи доповнюють один одного та в результаті дають змогу швидко створити веб-додаток із зручним веб-інтерфейсом користувача. Фреймворк Spring Boot відповідає за роботу усієї системи, фреймворк Vaadin відповідає за динамічне створення веб-інтерфейсу користувача використовуючи тільки код на Kotlin чи Java. Файлова база даних H2 не потребує виділення окремого серверу, та її швидкодії достатньою для невеликої кількості користувачів, а фреймворк Hibernate дозволяє взаємодіяти з базою даних програмно. За допомогою інструменту збирання Gradle, увесь код пакується у єдиний виконуваний файл з розширенням .jar, який і є готовим веб-додатком, який можна розгортати та використовувати як локально, так і на віддаленому веб-сервері.

Для реалізації базового функціоналу вивчення флеш-карток за методом інтервальних повторень були виконані наступні кроки:

1. Створення моделі даних для флеш-карток, яка включає поля, такі як “питання”, “відповідь”, “рівень пам'яті” та “дата останнього повторення”.

2. Розширення бази даних для зберігання флеш-карток та інформації про навчання.

3. Створення таблиці для зберігання історії повторень флеш-карток, включаючи дату та результати останнього повторення.

4. Реалізація алгоритму інтервальних повторень, який визначає, коли і які флеш-картки повторювати.

5. Оновлення полів “рівень пам'яті” та “дату останнього повторення” для кожної флеш-картки після кожного повторення.

6. Створення інтерфейсу для користувача за допомогою Vaadin, де він може додавати нові флеш-картки, переглядати їх і повторювати.

7. Додавання функціоналу для перевірки відповідей та оцінювання рівня пам'яті після кожного повторення.

8. Розроблення веб-сервісів для додавання, оновлення та видалення флеш-карток у серверній частині за допомогою Spring Boot.

9. Реалізація логіки для взаємодії з базою даних та алгоритмами повторень.

10. Використання Hibernate для доступу до бази даних та зберігання інформації про флеш-картки та їх повторення.

За допомогою цих кроків було створено простий веб-додаток, який дозволяє користувачам навчатися за методом інтервальних повторень, використовуючи віртуальні флеш-картки. Функціонал веб-додатку можна розширити та покращити шляхом додавання можливості налаштування параметрів повторень, збереження детальної статистики повторень, та інших функцій, які допоможуть користувачам ефективно вивчати матеріал.

На рис. 2 зображена структурна схема системи, яка показує загальний процес взаємодії між структурними компонентами системи, де Vaadin відпові-

дає за користувацький інтерфейс, Spring Boot – за логіку веб-додатку та обробку HTTP-запитів, а Hibernate – за взаємодію з базою даних.

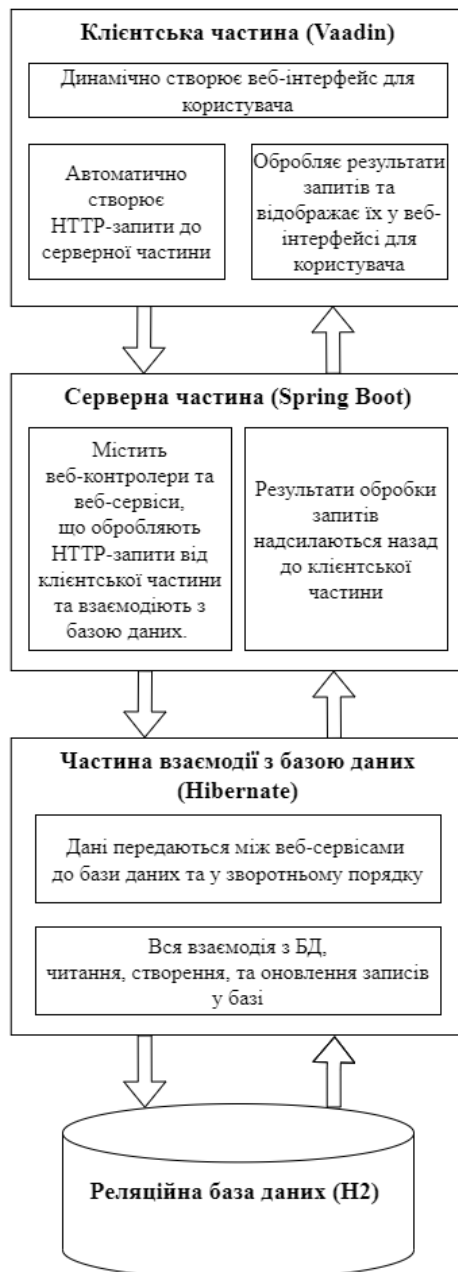


Рис. 2. Структурна схема розробленої системи

Проект системи, який використовує Spring Boot, Hibernate, H2 та Vaadin, може бути розділений на декілька структурних компонентів, кожен з яких відповідає за певну функціональність:

1. Клієнтська частина (Vaadin):

–Клієнтська частина створює веб-інтерфейс для користувача за допомогою Vaadin. Користувач взаємодіє з програмою через веб-браузер.

–Vaadin генерує запити до серверної частини, коли користувач взаємодіє з веб-інтерфейсом.

2. Серверна частина (Spring Boot):

–Spring Boot виконує роль веб-серверу та обробляє запити, надіслані від Vaadin.

–Він містить веб-контролери та веб-сервіси, які обробляють HTTP-запити та взаємодіють з базою даних.

–Результати обробки запитів надсилаються назад до клієнтської частини, і користувач бачить оновлену інформацію на веб-інтерфейсі.

3. База даних (Hibernate):

–Дані передаються між веб-сервісами та об'єктами доступу до бази даних.

–Hibernate використовується для роботи з базою даних, читанням, створенням, та оновленням записів у базі.

–Система використовує реляційну базу даних H2 в якості вбудованої бази даних.

Розроблена система надає наступний функціонал для реалізації інтервальних повторень:

1. Додавання флеш-карток:

–Ця функція дозволяє користувачам додавати нові флеш-картки до системи.

–Користувачі вводять текст питання та відповіді для кожної картки.

–Система зберігає ці дані в базі даних для подальшого вивчення.

2. Редагування флеш-карток:

–Дає змогу користувачам редагувати існуючі флеш-картки.

–Користувачі можуть змінювати текст питань та відповідей.

–Усі внесені зміни зберігаються в базі даних.

3. Вивчення флеш-карток:

–Використовує алгоритм повторення, який визначає, які флеш-картки виводити користувачам.

–Відображає флеш-картки користувачам, і вони повинні намагатися надати правильну відповідь.

–Відповіді користувачів аналізуються для визначення, коли кожну картку слід повторно показати користувачам.

4. Статистика навчання:

–Збирає, аналізує та відображає статистику навчання користувачів.

–Включає інформацію про те, скільки разів користувачі відповіли правильно або неправильно на питання, час вивчення кожної флеш-картки.

–Надає користувачам зворотний зв'язок про їхні досягнення та прогрес, допомагає аналізувати і покращувати навчальний процес.

5. Налаштування:

–Ця функція дозволяє користувачам налаштувати параметри системи під свої потреби.

–Налаштування включає в себе параметри повторення, режими навчання та інші налаштування.

6. Алгоритм повторення:

–Визначає, коли і які флеш-картки повторно виводити користувачам для оптимального навчання.

–Алгоритм враховує історію відповідей користувача та розподіляє повторення відповідно до методу інтервальних повторень.

7. Керування профілем користувача:

–Реєстрація користувача в системі є початковою точкою для користувачів і гарантує, що їхні да-

ні, налаштування та навчальний прогрес будуть збережені та доступні в системі.

Для керування та взаємодії з розробленою системою використовується веб-інтерфейс користувача. Він складається з окремих веб-сторінок, кожна з яких має своє окреме призначення та функції. Для перемикання між сторінками використовується бокове меню зі списком доступних сторінок. Веб-інтерфейс повністю адаптований для роботи з різними розмірами екрана, що дозволяє також використовувати його з мобільних пристроїв.

Розглянемо розроблений інтерфейс користувача веб-сервісу для дистанційного вивчення англійської мови.

На рис. 3 зображено головну сторінку «Колекції карток» – на ній відображається список доступних колекцій (наборів) флеш-карток, та надається можливість фільтрування та створення нових колекцій. Користувач може редагувати власні колекції, та видаляти їх разом з усіма їх картками. Для всіх користувачів доступні демонстраційні набори карток для різних рівнів володіння англійською мовою.

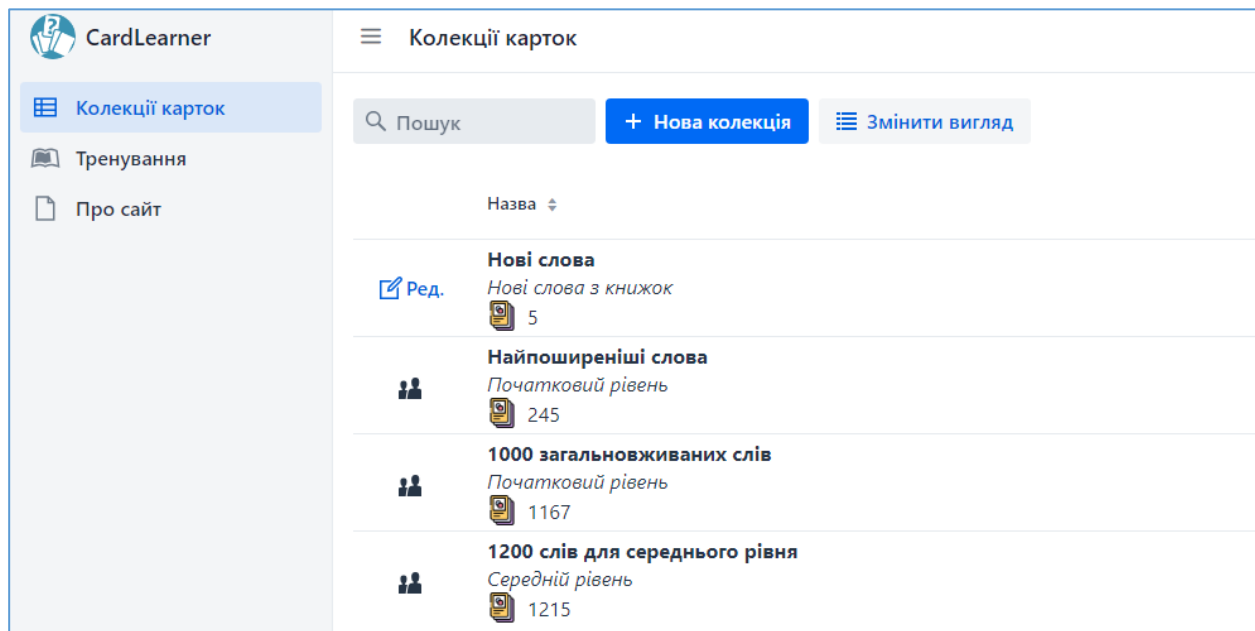


Рис. 3. Інтерфейс користувача розробленого веб-сервісу – головна сторінка «Колекції карток»

На рис. 4 зображено сторінку «Картки» – на ній відображається список флеш-карток у колекції, на-

дається можливість пошуку карток, додавання нових, редагування та видалення існуючих карток.

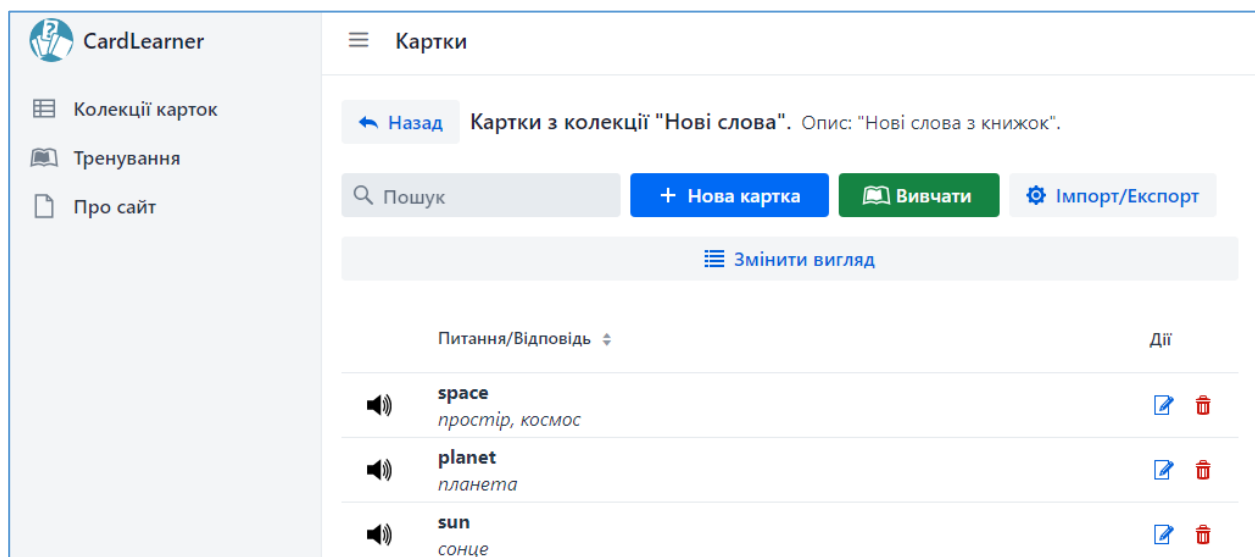


Рис. 4. Інтерфейс користувача розробленого веб-сервісу – сторінка «Картки»

На кожній картці відображається слово на англійській мові поряд з його перекладом на українську. Кожна картка має кнопку «аудіо» що дає можли-

вість прослухати як воно вимовляється. За допомогою кнопки «Вивчати», можна одразу перейти до вивчення карток з відкритої колекції. Також є мож-

ливість імпорту та експорту колекцій карток у вигляді файлів в форматі CSV. Це дає змогу імпортувати вже існуючі набори карток із сторонніх сервісів, або експортувати колекції з системи.

На рис. 5 зображено сторінку «Тренування» для тренування та запам'ятовування флеш-карток. Вона надає можливість користувачам вивчати картки та тестувати свої знання, використовуючи метод інтервальних повторень. На цій сторінці користувачі отримують сформований алгоритмом набір флеш-

карток, переглядають їх та відповідають на питання, що містяться на картках. Для кожного слова автоматично програватиметься аудіозапис з вимовою англійського слова.

Користувач може обрати один із запропонованих варіантів відповіді або, натиснувши кнопку «Не знаю», побачити правильну відповідь.

Після завершення тренування відображається сторінка з результатами, на якій показано усі надані відповіді (рис. 6).

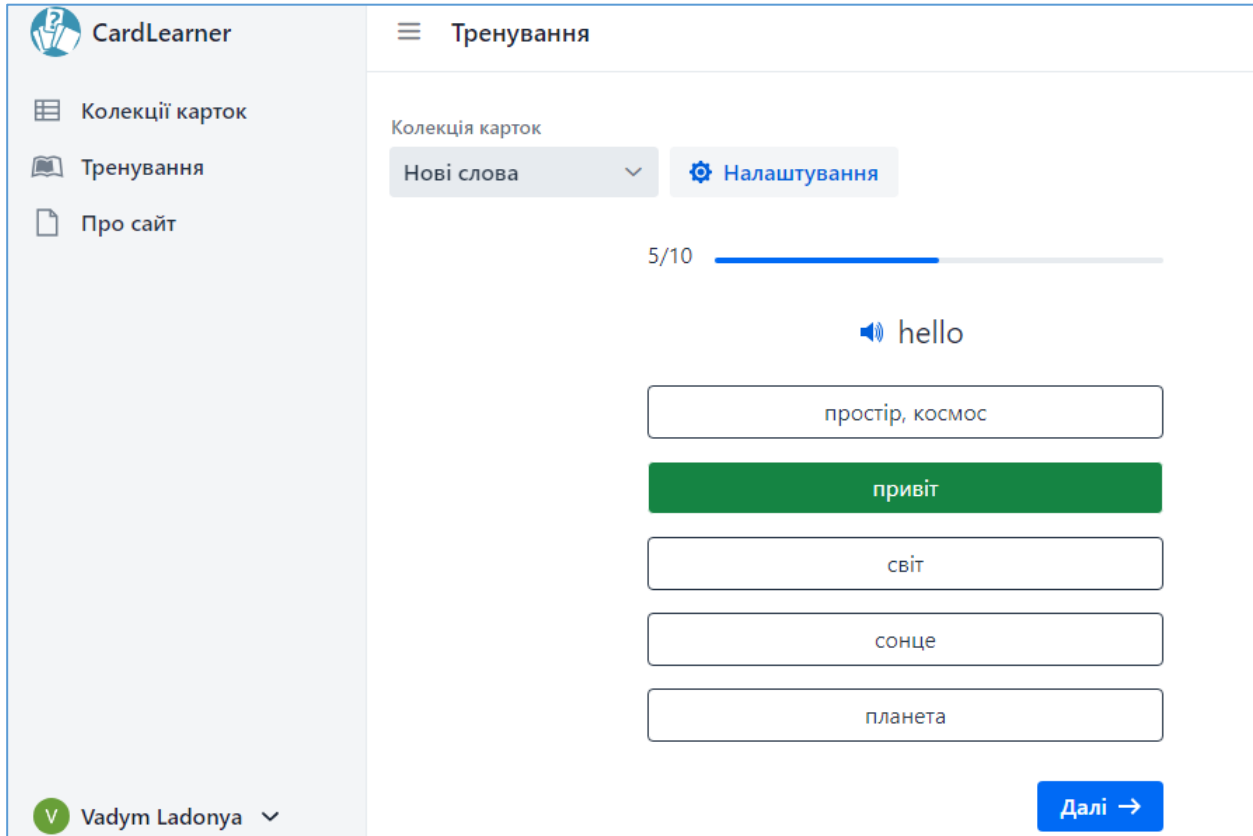


Рис. 5. Інтерфейс користувача розробленого веб-сервісу – сторінка «Тренування»

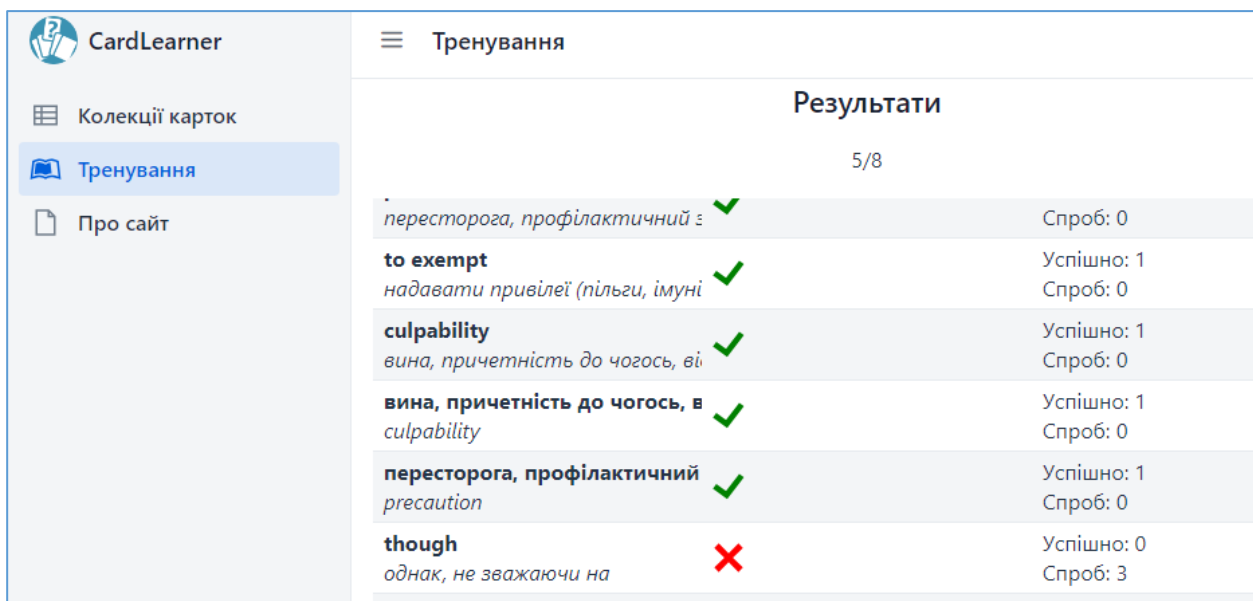


Рис. 6. Інтерфейс користувача розробленого веб-сервісу – сторінка «Результати»

Розроблена система використовує фреймворк Spring Security у поєднанні з протоколом OAuth2.

Це дозволяє користувачам використовувати для входу у систему вже існуючі облікові записи на сторонніх платформах, таких як Google, Facebook та Github.

Також усі комунікації між системою та сторонніми сервісами захищені протоколом HTTPS.

Висновки

У цій роботі було розроблено та реалізовано веб-сервіс для вивчення англійської мови методом інтервальних повторень. Були досліджені та викорис-

тані засоби розробки програмного забезпечення, серед яких: Spring Boot для створення серверної частини, Hibernate для роботи з базою даних, H2 як вбудована база даних для розробки та тестування та Vaadin для створення користувацького інтерфейсу.

Застосування запропонованого методу планування інтервальних повторень дало змогу автоматично оптимізувати інтервали між повтореннями для кожного навчального елементу, забезпечуючи ефективний процес навчання та запам'ятовування, що допомагає швидше поповнювати словниковий запас користувача та дозволяє йому запам'ятовувати більше нових слів англійської мови.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Higgins J. Computer assisted language learning. *Language Teaching*. 1983. Vol. 16(2). P. 102-114. DOI: <https://doi.org/10.1017/S026144480009988>
- Tamm S. The Leitner System: What It Is, How It Works. *E-Student*. 2023. URL: <https://e-student.org/leitner-system/>
- Kang S. H. K. Spaced Repetition Promotes Efficient and Effective Learning. *Policy Insights from the Behavioral and Brain Sciences*. 2016. Т. 3, № 1. P. 12–19. DOI: <https://doi.org/10.1177/2372732215624708>
- Tabibian B., Upadhyay U., De A., Zarezade A., Schölkopf B., Gomez-Rodriguez M. Enhancing human learning via spaced repetition optimization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019. Т. 116, № 10. P. 3988–3993. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1815156116>
- Chukharev-Hudilainen E., Klepikova T. A. The effectiveness of computer-based spaced repetition in foreign language vocabulary instruction: a double-blind study. *CALICO Journal*. 2014. Т. 33, № 3. P. 334–354. DOI: <https://doi.org/10.1558/cj.v33i3.26055>
- Bower J. V., Rutson-Griffiths A. The relationship between the use of spaced repetition software with a TOEIC word list and TOEIC score gains. *Computer Assisted Language Learning*. 2016. Т. 29, № 7. P. 1238–1248. DOI: <https://doi.org/10.1080/09588221.2016.1222444>
- Schimanke F., Mertens R., Vornberger O. Architecture Considerations for Spaced Repetition Based Mobile Learning Games on iOS. *2014 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM), Taichung, Taiwan*, 10–12 Dec. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/ism.2014.17>
- Yan T., Zhou D. The influence of spacing effect on L2 vocabulary learning: A study on Chinese university students. *System*. 2023. P. 103049. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.system.2023.103049>
- Smolen P., Zhang Y., Byrne J. The right time to learn: mechanisms and optimization of spaced learning. *Nature Reviews Neuroscience*. 2016. Vol. 17, P. 77–88. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrn.2015.18>
- Greene R. L. Repetition and spacing effects. In Roediger H. L. III (Ed.), *Learning and memory: A comprehensive reference. Cognitive Psychology of Memory*, Oxford: Elsevier. 2008. Vol. 2, P. 65–78. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012370509-9.00168-6>
- Curve of Forgetting. *Campus Wellness, University of Waterloo*. URL: <https://uwaterloo.ca/campus-wellness/curve-forgetting>
- Whelan J. Using the Leitner System to improve your study. *Medium*. 2019. URL: <https://jessewhelan.medium.com/using-the-leitner-system-to-improve-your-study-d5edafae7f0>

Received (Надійшла) 15.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.04.2024

Development and software implementation of an intelligent web service for learning foreign language by the spaced repetition method

V. Ladonya, Ye. Meleshko, M. Yakymenko

Abstract. The subject of the article is the methods of constructing an online system for learning a foreign language using spaced repetition methodology. The article presents the results of developing a web service for studying the English language. Spaced repetition is an effective technique for learning and memorizing information. This methodology is based on the principles of cognitive psychology and involves systematic repetition of material at certain intervals of time between repetitions. The main idea of spaced repetition is that information is better retained in memory if the user reviews it at precisely defined moments when memory begins to weaken but knowledge is not yet completely forgotten. For the development of the system, the Kotlin programming language and IntelliJ IDEA development environment were used, as well as the Spring Boot framework for creating the core of the system, Vaadin framework for creating the user web interface, H2 database for storing all entered information, Hibernate framework as the database interaction interface, and Gradle build tool for system compilation, assembly, and management of all versions of connected libraries. The developed system has a client-server architecture. The client-side creates a web interface for the user and generates requests to the server-side when the user interacts with the web interface. The server-side contains web controllers and web services that handle HTTP requests and interact with the database. The developed system provides the following functionality for implementing spaced repetition: adding flashcards, editing flashcards, studying flashcards, training statistics, settings, choice of repetition algorithm, and managing user profiles. The developed web service can be used as an additional resource in the English language education in schools and universities, facilitating the process of learning foreign words or as a tool for continuous practice and vocabulary expansion for individuals studying English independently.

Keywords: distance learning, spaced repetition, flash cards, foreign language learning, web service, web programming, intelligent system, scripted language programming, algorithms, cyberpsychology.

D. Mezin¹, N. Kuchuk^{1,2}, A. Lyashova¹, S. Partyka¹, D. Lysytsia²

¹ Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

² National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

THE METHOD OF OBSERVING MOVING OBJECTS

Abstract. The article analyzes known algorithms for tracking moving objects. Based on an analysis of known algorithms for tracking moving objects, it was concluded that the best tracking quality in problems with a large number of observed objects is achieved by solutions built on the basis of probabilistic and hierarchical methods. Each of them has complementary advantages, which creates prospects for creating new algorithmic solutions built on the synergy of these approaches. The main task of promising tracking methods is that they should provide ease of scaling with an increase in the number of moving objects that need to be monitored, localize objects in three-dimensional space, and also be able to work with heterogeneous sensors. This approach has both purely technical advantages and those related to the availability of microelectronics components in modern geopolitical realities.

Keywords: tracking, moving objects, pattern recognition, computing system, logical blocks.

Introduction

The rapid development of artificial intelligence technologies in recent years has significantly improved the quality of automatic image recognition, making it possible to segment complex scenes and highlight objects of interest both in the video stream and in data from other sensors, for example, scanning laser rangefinders [1–4].

This, among other things, made it possible to create local navigation systems capable of operating without the use of satellite systems, ensure identification of personnel using facial recognition, develop systems for automatically detecting emergency situations at production facilities, etc.

At the same time, in many practical tasks it is required not only to recognize the presence of this or that object, but to track and analyze the trajectory of its movement in the long term.

If an object is actively moving to cover all parts of its trajectory, it may be necessary to integrate information from several sensors [5–7]. The task becomes even more complicated when the required number of simultaneously tracked objects increases to tens and hundreds.

Main part

Promising tracking methods should provide ease of scaling with an increase in the number of moving objects that need to be tracked, localize objects in three-dimensional space, and also be able to work with heterogeneous sensors. From the point of view of tracking quality, the greatest interest is in works devoted to algorithms based on probabilistic and hierarchical methods.

Most of the studies reviewed in the literature review that had the best quality indicators were assessed using the MOTA (multiple object tracking accuracy) metric using the open APIDIS dataset.

In this regard, this metric and test data set are proposed to be used for this work.

In Table 1 presents the results of a comparison of the tracking quality of well-known algorithms that have the best tracking quality according to the multiple object tracking accuracy metric when verified on the APIDIS data set.

Table 1 – Comparison of the quality of tracking of known algorithms when they are verified on the APIDIS data set

| Tracking algorithm | MOTA |
|--|--------|
| Online Multiple Athlete Tracking with Pose-Based Long-Term Temporal Dependencies | 75.2 % |
| Variational inference for 3-D localization and tracking of multiple targets using multiple cameras | 79.6 % |
| Multi-camera multi-player tracking with deep player identification in sports video | 81.1% |
| Robust, real-time 3d tracking of multiple objects with similar appearances | 85.5 % |
| Developed algorithmic solutions | 85.8 % |

Estimating target localization accuracy requirements based on existing work is more challenging. The fact is that in most works, in contrast to tracking quality metrics, such data are provided. And in those works where localization accuracy is measured, it is, as a rule, assessed exclusively in the coordinate system and units of measurement of individual sensors. The latter is due to the fact that in order to assess accuracy during field experiments, it is necessary to know the exact position of all observed objects at each moment in time, which is much more difficult to ensure in practice, compared, for example, with marking data sets necessary for calculating multiple object tracking accuracy or similar metrics.

Methods for solving problems of tracking moving objects in real time.

The ability of a particular algorithm to operate in real time is determined, on the one hand, by its computational complexity, and on the other, by the performance of the computing devices on which it runs.

As practice shows, in order to achieve high performance in solving problems of tracking a large number of objects, it is necessary to use specialized hardware accelerators along with general-purpose processors.

Such accelerators, as a rule, are graphics processing units (GPUs) [8] or reconfigurable programmable logic

integrated circuits [9, 10]. In addition, there are also processors equipped with specialized units to speed up and parallelize calculations.

However, from an applied point of view, such accelerators are not much different from GPUs, so in this work they will be considered together as a single group of task-oriented ultra-large-scale integrated circuits.

Fig. 1 shows a generalized block diagram of a GPU-based computing system.

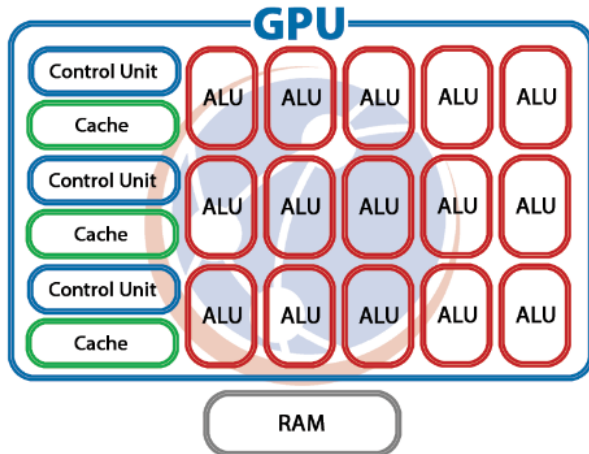


Fig. 1 Generalized block diagram of a GPU-based computing system

As you can see, the GPU includes a large number of independent arithmetic-logical units (ALUs), combined into groups that have a common control unit and cache. This structure allows you to perform a large number of calculations in parallel, significantly speeding up matrix

transformations, Fourier analysis, color filtering and many others. To operate, GPU kernels require a general-purpose processor, which is typically coupled to the GPU through shared Random-access memory (RAM).

It is worth noting that this memory is one of the biggest bottlenecks when solving problems of hardware acceleration of calculations using GPUs. The fact is that, with rare exceptions, this memory is separate from the main RAM, used by a general-purpose processor to execute programs running on it. Accordingly, data loaded during the operation of these programs requires additional copying to memory associated with the GPU. As a result, if operations performed on the GPU and on a general-purpose processor are performed alternately, the time required to copy data between different blocks of memory may outweigh any benefits obtained through hardware acceleration.

Unlike a GPU, a programmable logic integrated circuit is not a complete solution, but a platform for creating specialized computing devices. It is a reconfigurable matrix of standard logical blocks that can be connected by a programmable interconnect both to each other and to the inputs/outputs of the microcircuit (Fig. 2).

A typical logic block includes truth tables and flip-flops, allowing, using their combination, to create the required hardware architecture of an implementable digital data processing unit.

Also, modern programmable logic integrated circuits can contain specialized memory units and hardware acceleration of calculations (for example, hardware multipliers or multiply-accumulate units), which significantly speed up calculations compared to their execution solely using standard logic blocks [11, 12].

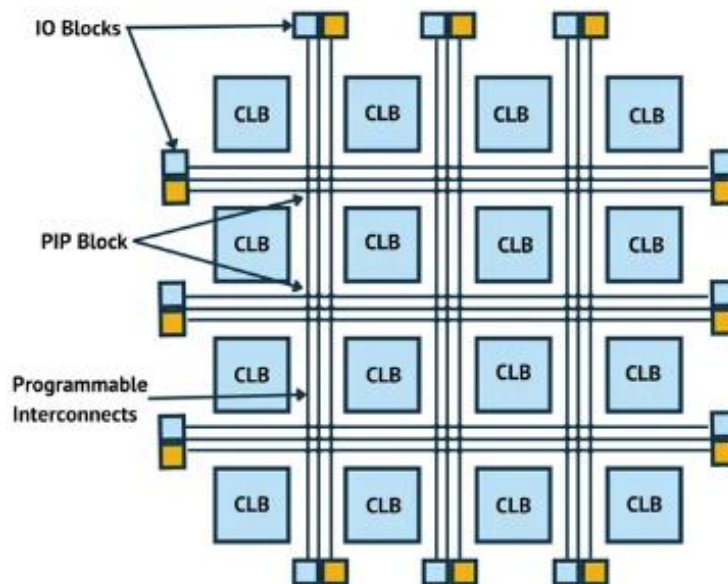


Fig. 2. Generalized block diagram of a programmable logic integrated circuit

One of the main disadvantages of a programmable logic integrated circuit compared to a GPU is the operating frequency.

Thus, many modern GPUs operate at frequencies above 1.5 GHz, providing performance of tens of TFLOPS [13]. At the same time, the clock frequencies of digital

signal processing cores implemented on non-programmable logic integrated circuits rarely exceed 200 MHz, and in many cases their frequency is less than 100 MHz.

At the same time, the scientific literature has repeatedly described cases when, when solving applied

problems, a programmable logic integrated circuit was superior in performance to the GPU [1? 154].

This is achieved due to the fact that on a programmable logic integrated circuit, computing cores can be deeply optimized for a specific digital data processing algorithm, while GPU ALUs were created to solve a wide range of tasks, primarily characteristic of 3D graphics visualization. As in the case of GPUs, when creating hardware computing accelerators, it is necessary to minimize data exchange with a general-purpose processor in order to avoid the influence of transport delays of the communication interface with a programmable logic integrated circuit on computing performance. At the same time, when implementing algorithms for tracking moving objects based on a

programmable logic integrated circuit, it is also possible to implement the general-purpose processor itself on the same programmable logic integrated circuit as specialized computing cores [16].

This approach makes it possible to optimize data exchange between all components of a computer system, however, it is not without its drawbacks, the main one of which is the reduction in the clock frequency of a general-purpose processor to a level of 50-200 MHz, typical for solutions based on a programmable logic integrated circuit.

Table 2 shows the results of a comparison of the advantages and disadvantages of hardware acceleration of calculations based on the GPU and a programmable logic integrated circuit, obtained as a result of the analysis [17].

Table 2 – Comparison of advantages and disadvantages of hardware acceleration of calculations

| GPU | Programmable logic integrated circuit |
|---|--|
| Advantages | |
| Higher performance in high-dimensional problems. | The ability to flexibly optimize solutions for a specific calculation algorithm |
| Developed design tools that allow you to quickly implement the necessary data processing algorithms | High performance/energy consumption ratio |
| Ability to operate at higher frequencies | The ability to create integrated solutions that do not require an additional microprocessor in the form of a separate chip |
| Lower cost with the same level of integration | Easily transfer solutions between chips from different manufacturers |
| Disadvantages | |
| Limited choice of chips, making transferring projects between them difficult | Overall complexity of the programmable logic integrated circuit hardware and software development process |
| Limited power optimization options | Inability to operate at high frequencies using microcircuits, with the exception of ultra-expensive solutions |

As can be seen from Table 2, the main advantages of GPUs are high performance in large-scale problems and developed tools for creating the necessary software. The advantages of a programmable logic integrated circuit are: the ability to more flexibly optimize hardware solutions for the required calculation algorithm, including minimizing power consumption, the ability to create an integrated solution that does not require a separate microprocessor, and the ease of transferring created solutions between microcircuits from different manufacturers.

The latter advantage becomes especially relevant in the context of ever-increasing geopolitical sanctions, when the range of available microcircuits is not only constantly decreasing, but changing in composition over time [18, 19].

Thus, from the point of view of ensuring technological sovereignty, the use of a programmable logic integrated circuit is more promising compared to the use of GPUs. From the perspective of the general architecture of computing organization, tracking systems for moving objects can be divided into three classes: integrated, centralized and distributed.

Integrated solutions involve placing a computing device directly in the body of a particular sensor. An example of such devices are modules on the ELISE platform (Fig. 3), as well as processing units for integrated cameras based on a programmable logic integrated circuit.



Fig. 3. Computing module on the ELISE platform

The main advantage of integrated sensors is virtually unlimited access to all data combined with minimal transport delays between the measuring units and the computing device.

You can also note the ease of deployment of such systems due to the minimum number of required additional components. The main disadvantage of integrated sensors is their extremely limited scaling capabilities.

Thus, vertical scaling, as a rule, is limited by the size of the sensor, the energy resources of its power source and heat dissipation capabilities.

In addition, using integrated computing systems makes it difficult to integrate various sensory data, since in this case a fairly compact computing device must not only process large volumes of primary data, but also have the necessary volume of high-speed interfaces to receive them.

In the case of horizontal scaling, such systems move into the class of distributed computing systems [5], which will be discussed below.

Centralized systems involve processing data and implementing algorithms for tracking moving objects on a separate computing device.

Today, this is one of the most common options for systems with a large number of sensors [9].

It allows you to use the most productive multiprocessor systems by placing them in separate server racks and providing them with forced cooling. Such systems can be equipped with a large number of high-performance interfaces, including Gigabit Ethernet standards, which allows them to process and integrate a virtually unlimited number of sensors.

The main method of scaling such systems is vertical scaling, but individual components (for example, network interfaces or memory units) may allow horizontal scaling.

This explains the key disadvantage of centralized systems: they usually require decommissioning to scale up.

This requirement itself may not be acceptable for applications in the field of public safety, as well as special and military equipment.

In addition, the need to decommission systems makes it difficult to change the fluctuations in computing load over time, which is typical, for example, for traffic analysis systems [17]. The solution to this problem is the transition from centralized to distributed computing systems [7].

In distributed systems, algorithms are executed simultaneously on multiple computing devices, creating the possibility of both vertical and horizontal scaling.

Moreover, in the most advanced of them, it is possible to change the composition of computing devices "on the fly," providing both compensation for load surges over time and a high degree of equipment availability, including during repairs and routine maintenance.

A generalized block diagram of a distributed computing system for tracking moving objects is shown in Fig. 4.

Distributed systems can be built both on the basis of individual computing devices, which, among other

things, process primary sensor data, and on the basis of sensors with an integrated computer [19].

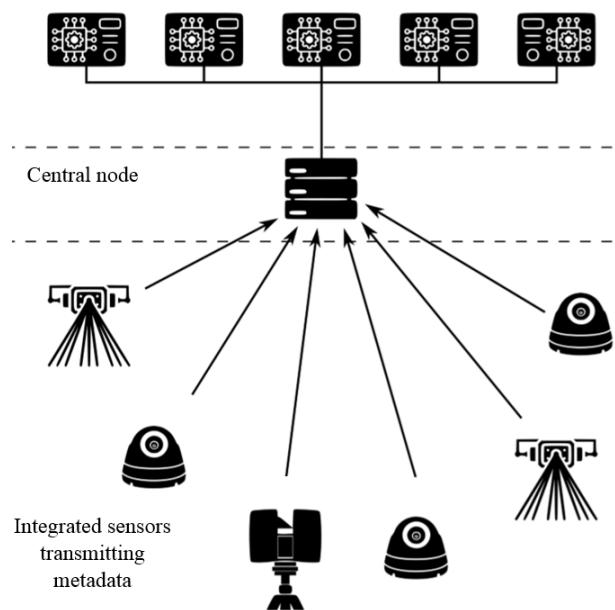


Fig. 4. Generalized block diagram of a distributed computing system for tracking moving objects

In the latter case, it seems promising to use the sensor's on-board computer for primary processing of its information, performing segmentation and pattern recognition procedures, the output of which will generate metadata about each of the selected objects.

Next, this metadata will be transmitted via communication channels to distributed computing nodes, which, based on it, will provide a comparison of objects isolated from the data of various sensors with each other and predict their trajectory.

This approach has successfully proven itself in robotics.

It allows you to significantly reduce the throughput of communication channels and at the same time ensure overall high reliability of the end system.

Moreover, by reducing traffic from the sensors used to simplify implementation, it can have a central node that will distribute the most resource-intensive calculations and manage data flows in the system.

Conclusions

Based on an analysis of known algorithms for tracking moving objects, it was concluded that the best tracking quality in problems with a large number of observed objects is achieved by solutions built on the basis of probabilistic and hierarchical methods. Each of them has complementary advantages, which creates prospects for creating new algorithmic solutions built on the synergy of these approaches. An analysis of known methods for ensuring the operation of real-time tracking systems has shown that the most promising way to achieve the goal of this work is the creation of algorithms that can be executed in the architecture of a distributed computing system based on hardware accelerators implemented using a programmable logic integrated

circuit. This approach has both purely technical microelectronics components in modern geopolitical advantages and those related to the availability of realities.

REFERENCES

1. Yaloveha, V., Hlavcheva, D. and Podorozhniak, A. (2019), "Usage of convolutional neural network for multispectral image processing applied to the problem of detecting fire hazardous forest areas", *Сучасні інформаційні системи*, Vol. 3, No 1, pp. 116–120, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.1.19>
2. Kuchuk, H., Kovalenko, A., Ibrahim, B.F. and Ruban, I. (2019), "Adaptive compression method for video information", *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 8(1), pp. 66–69, DOI: <http://dx.doi.org/10.30534/ijatcse/2019/1181.22019>
3. Datsenko, S., and Kuchuk, H. (2023), "Biometric authentication utilizing convolutional neural networks", *Advanced Information Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 67–73. Doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.10>
4. Hlavcheva, D., Yaloveha, V., Podorozhniak, A. and Kuchuk, H. (2021), "Comparison of CNNs for Lung Biopsy Images Classification", *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2021 – Proceedings*, pp. 1–5, doi: <https://doi.org/10.1109/UKRCON53503.2021.9575305>
5. Dun B., Zakovorotnyi, O. and Kuchuk, N. (2023), "Generating currency exchange rate data based on Quant-Gan model", *Advanced Information Systems*, Vol. 7, no. 2, pp. 68–74, doi: <http://dx.doi.org/10.20998/2522-9052.2023.2.10>
6. Svyrydov, A., Kuchuk, H. and Tsiapa, O. (2018), "Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study", *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*, pp. 593–597, DOI: <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>
7. Kovalenko, A. A. (2014), "Approaches to the synthesis of the technical structure of a computer system forming the control system of an object of critical application", *Collection of scientific works of Kharkiv National University of Air Forces*, No. 1 (38), pp. 116–119.
8. Худов В. Г., Кучук Г. А., Маковейчук О. М., Крижний А. В. (2016), "Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптикоелектронного спостереження", *Системи обробки інформації*, Вип. 9 (146). С. 77–80.
9. Khizhnyak, I. (2019), "Applied Information Technology of Thematic Segmentation of Optical-Electronic Images from On-board Systems of Remote Sensing of the Earth", *Advanced Information Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 40–46, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.2.07>
10. Al-Azawi, R. J., Al-Jubouri, Q. S. and Mohammed, Y. A. (2019), "Enhanced Algorithm of Superpixel Segmentation Using Simple Linear Iterative Clustering", *IEEE 12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*, vol. 19568614, doi: <https://doi.org/10.1109/DeSE.2019.00038>
11. Ткачов В. М., Коваленко А. А., Кучук Г. А., Ні Я. С. Метод забезпечення живучості високомобільної комп'ютерної мережі. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Том 5, № 2. С. 159–165. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.22>
12. Pesaresi, M. and Benediktsson, J. A. (2001), "A new approach for the morphological segmentation of high-resolution satellite imagery", *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39 (2), pp. 309–320, doi: <https://doi.org/10.1109/36.905239>
13. Avenash, R. and Viswanath, P. (2019), "Semantic Segmentation of Satellite Images using a Modified CNN with Hard-Swish Activation Function", *14th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP)*, pp. 413–420, doi: <https://doi.org/10.5220/0007469604130420>
14. Neupane, B., Horanont, T. and Aryal, J. (2021), "Deep Learning-Based Semantic Segmentation of Urban Features in Satellite Images: A Review and Meta-Analysis", *Remote Sensing*, vol. 13(4), 808, doi: <https://doi.org/10.3390/rs13040808>
15. Long, J., Shelhamer, E. and Darrell, T. (2015), "Fully convolutional networks for semantic segmentation", *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 3431–3440, doi: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298965>
16. Lopez, J., Branch, J. W. and Chen, G. (2019), "Line-based image segmentation method: a new approach to segment VHRS remote sensing images automatically", *European Journal of Remote Sensing*, vol. 52 (1), pp. 613–631, doi: <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1699449>
17. Hassanien, E. and Emary, E. (2016), "Swarm Intelligence Principles, Advances, and Applications", CRC Press, 220 p., doi: <https://doi.org/10.1201/9781315222455>
18. Kovalenko, A.A. and Kuchuk, G.A. (2016), "Optimal traffic control of a multiservice network based on the methods of sequential improvement of solutions", *Systems of armament and military equipment*, No. 3 (47), pp. 59–63.
19. Khudov, H., Makoveichuk, O., Khizhnyak, I., Glukhov, S., Shamrai, N., Rudnichenko, S., Husak, M. and Khudov, R. (2022), "The Choice of Quality Indicator for the Image Segmentation Evaluation", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, No. 12 (10), pp. 95–103, doi: https://doi.org/10.46338/ijetae1022_11

Received (Надійшла) 19.01.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 03.04.2024

Метод спостереження за рухомими об'єктами

Д. О. Мезін, Н. Г. Кучук, А. О. Ляшова, С. О. Партика, Д. О. Лисиця

Анотація. У статті проведено аналіз відомих алгоритмів стеження рухомих об'єктів. На основі аналізу відомих алгоритмів відстеження рухомих об'єктів зроблено висновок, що найкраща якість відстеження в задачах із великою кількістю спостережуваних об'єктів досягається рішеннями, побудованими на основі імовірнісних та ієрархічних методів. Кожен з них має взаємодоповнюючі переваги, що створює перспективи для створення нових алгоритмічних рішень, побудованих на синергії цих підходів. Головне завдання перспективних методів стеження полягає в тому, що вони повинні забезпечувати простоту масштабування зі збільшенням кількості рухомих об'єктів, за якими необхідно стежити, здійснювати їх локалізацію об'єктів у тривимірному просторі, а також мати можливість роботи з різномірними сенсорами. Такий підхід має як суто технічні переваги, так і пов'язані з доступністю компонентів мікроелектроніки в сучасних геополітичних реаліях.

Ключові слова: стеження, рухомі об'єкти, розпізнавання образів, обчислювальна система, логічні блоки.

С. В. Мінухін^{1,2}, М. О. Башкіров¹

¹ Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

² Харківський національний економічний університет імені С. Кузнеця, Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ГЕНЕРАЦІЇ ТЕСТОВИХ ДАНИХ В РЕЛЯЦІЙНИХ БАЗАХ ДАНИХ

Анотація. У статті проведено порівняльний аналіз трьох основних методів генерації тестових даних для реляційних баз даних: циклічного, на основі Common Table Expressions (CTE) та з використанням тимчасових таблиць. Експериментальне тестування здійснено в середовищі MS SQL Server на прикладі таблиць бази даних торговельної компанії. Проведено порівняння за ключовими метриками ефективності генерації - часу генерації, використання системних ресурсів та масштабованість об'ємів таблиць тестової бази даних. Результати дослідження обґрунтували ефективність методу рекурсивних CTE для різних обсягів і структур даних. Подано рекомендації щодо вибору методів генерації тестових наборів відповідно до вимог проектів БД, зокрема при використанні сервісів роботи з реляційними БД на хмарних платформах.

Ключові слова: база даних, Microsoft SQL Server, тестування, генерація даних, T-SQL, оптимізація, рекурсивні запити, тимчасові таблиці, генерація з циклами.

Вступ

Генерація тестових даних, зокрема, великих об'ємів, є важливим та актуальним завданням у сучасному проектуванні та розробленні баз даних. Зі зростанням потужності обчислювальних систем та обсягів даних, з якими вони працюють, потреба в репрезентативних тестових наборах стрімко зростає.

Генерування великих масивів тестових даних дозволяє всебічно перевірити продуктивність та масштабованість системи бази даних, оцінити її стійкість до високих навантажень, а також порівняти ефективність різних методів оброблення та зберігання [1]. Без наявності репрезентативних тестових наборів, які можуть бути отримані оперативним шляхом та за існуючими моделями БД, складно забезпечити стабільну та безперебійну роботу системи в реальних умовах експлуатації великих обсягів даних. Однією з ключових проблем при цьому є вибір оптимальної стратегії (методів) генерування необхідних обсягів тестових даних, яка забезпечувала б прийнятну швидкість (час) та ресурсоефективність задіяних ресурсів. Натепер існує декілька методів автоматизованої генерації тестових даних для баз даних із використанням мови T-SQL, зокрема - це методи на основі рекурсивних запитів, тимчасових таблиць, процедур та інш. [2]. Проте комплексний порівняльний аналіз їх ефективності та оптимальності застосування в різних сценаріях на сьогодні є недостатнім.

Метою даної роботи є дослідження та порівняльний аналіз трьох основних методів генерації тестових даних: на основі циклів, Common Table Expressions (CTE) та тимчасових таблиць в середовищі СУБД MS SQL Server. Експериментальне тестування дозволить кількісно оцінити їх ефективність за ключовими метриками продуктивності та ресурсоефективності для різних сценаріїв та обсягів баз даних.

На основі отриманих результатів буде зроблено обґрунтовані висновки щодо ефективності застосування кожного з методів генерації тестових даних для конкретних задач тестування та навантаження баз даних. Будуть сформульовані практичні рекомендації

щодо ефективного використання проаналізованих методів на прикладах таблиць БД з різними об'ємами даних.

Аналіз проблеми генерації даних та існуючих методів

Генерація тестових даних великих обсягів для баз даних є складним завданням, що визначається наступним.

1. Важливо забезпечити репрезентативність та різноманітність даних [2]. Тестові дані мають бути максимально наближені до реальних, щоб адекватно імітувати робочі навантаження [3]. При цьому важливо уникати шаблонності, оскільки це може знизити об'єктивність результатів тестування.

2. Важливо забезпечити унікальність кожного запису та значень ключових полів. Дублювання даних може призвести до помилок та неадекватного тестування системи.

3. Важливим аспектом є швидкість (час) та масштабованість генерації. Процес має бути ефективним навіть для дуже великих обсягів даних.

Існує декілька методів використання готових генераторів, генерація через API бібліотек, експорт та модифікація реальних даних, використання скриптів СУБД [3]. Останній підхід з використанням скриптів СУБД є найбільш гнучким та ефективним для генерації великих обсягів тестових даних. У даній статті розглядаються три основні методи: генерація циклами [4], генерація за допомогою CTE [5] та генерація тимчасовими таблицями [5]. Вони дозволяють гнучко налаштувати логіку, мають просту реалізацію та добре масштабуються.

Отже, саме поєднання простоти, гнучкості та масштабованості визначило цикли, CTE та тимчасові таблиці оптимальним вибором методів для дослідження завдання генерації тестових даних у даному дослідженні. Результати порівняльного аналізу дозволять виявити переваги та недоліки кожного підходу для різних сценаріїв їх використання. Це дозволить обрати оптимальний метод генерації даних для конкретних умов використання бази даних.

Проектування бази даних

Проектування оптимальної схеми БД – важливий етап розробки для забезпечення ефективного зберігання та швидкого доступу до даних. Для формування тестових завдань була обрана модель БД, яка наведена у роботі [6]. База даних має забезпечувати зберігання інформації про продукти, категорії, бренди, клієнтів, замовлення та працівників для автоматизації операційної діяльності та управління торговельною компанією. Для реалізації цих вимог структури та зв'язки між ними будуть перетворені у структуру реляційної бази даних. Зокрема, кожна бізнес-сутність представляється у окрему таблицю з унікальним первинним ключем. Атрибути цих сутностей стають колонками в таблицях. Зв'язки між сутностями реалізуються за допомогою зовнішніх ключів.

Виходячи з аналізу предметної області, було виділено такі ключові сутності для моделювання структури бази даних: Products (Продукти); Categories (Категорії); Brands (Бренди); Customers (Клієнти); Orders (Замовлення); OrderDetails (Деталі замовлення); Employees (Працівники).

Ці сутності найбільш повно описують основні об'єкти та процеси, задіяні у діяльності торговельної компанії. Було створено такі зв'язки між сутностями:

- Продукти – Категорії (багато-до-одного): продукти класифікуються за категоріями;
- Продукти – Бренди (багато-до-одного): бренди випускають продукти;
- Замовлення – Клієнти (багато-до-одного): клієнти роблять замовлення;
- Замовлення – Працівники (багато-до-одного): працівники обробляють замовлення;
- Замовлення – Деталі замовлень (один-до-багатьох): замовлення складаються з деталей замовлень;
- Деталі замовлень – Продукти: продукти входять в деталі замовлень. (Багато-до-одного).

На основі визначених сутностей та зв'язків побудована фізична модель даних. Завдяки фізичній моделі можна реалізувати БД в конкретній СУБД Microsoft SQL Server. Перевірка працездатності відбуватиметься шляхом генерування та заповнення таблиць тестовими даними. Фізична модель бази даних представлена на рис. 1.

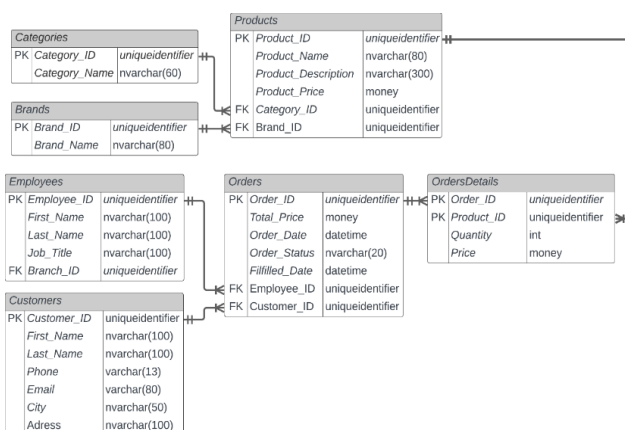


Рис. 1. Фізична модель бази даних

Отже, такий підхід до проектування БД забезпечить створення гнучкої та оптимізованої структури бази даних, що задовольнить вимоги до швидкодії та масштабованості системи.

Ця модель використана для проведення дослідження щодо генерації даних.

Підготовка даних

Для об'єктивного порівняльного аналізу методів генерації тестових даних було сформовано репрезентативну вибірку таблиць з бази даних торговельної компанії. Обрані таблиці Products, Orders та OrderDetails як ключові для відображення бізнес-процесів компанії з складною структурою баз даних та різними типами зв'язків.

Визначено діапазон обсягів генерованих даних від 1 до 10 млн рядків для кожної таблиці. Сформовано вибірки з довідкових таблиць (Categories, Brands тощо) для забезпечення реалістичності тестових даних. Перевірено працездатність схеми БД шляхом попередньої генерації та заповнення її таблиць.

Основними критеріями відбору таблиць є такі:

- ключова роль у бізнес-процесах компанії (оформлення замовлень, облік товарів);
- складна структура даних з багатьма атрибутами та зв'язками для оцінювання ефективності методів генерації у реалістичних сценаріях;
- наявність різних типів зв'язків (один-до-багатьох, багато-до-одного, багато-до-багатьох).

Комбінація таблиць Orders, OrderDetails і Products найповніше репрезентує ключові сутності та бізнес-процеси компанії.

Тестування цих таблиць дозволить порівняти ефективність методів генерації великих обсягів реалістичних даних.

Аналіз методів генерації даних

У цій роботі проаналізовано наступні три методи генерації даних: генерація циклами, генерація за допомогою CTE (common table expressions) та генерація тимчасовими таблицями.

Метою аналізу є визначення особливостей кожного методу, а також його сильних і слабких сторін. Це дозволить обґрунтувати, за яких умов той чи інший метод буде найбільш ефективним.

Методи генерації даних порівнювалися за такими критеріями:

- швидкість генерації;
- споживання ресурсів (пам'яті);
- здатність масштабуватися при збільшенні об'ємів даних.

Для порівняння методів генерації даних обрано такі метрики:

- швидкість генерації: час, необхідний для генерації рядків таблиць бази даних. Важлива для оцінки ефективності методу для великих баз даних;
- використання ресурсів: об'єм пам'яті, що займає генерація даних. Важлива для аналізу продуктивності та ефективності використання ресурсів;
- масштабованість: здатність методу працювати зі зростанням обсягів даних, вимірюється кількістю згенерованих записів. Методи з хорошою

масштабованістю ефективно обробляють збільшення даних без значного зниження швидкості або збільшення використання ресурсів.

Важливо зазначити, що вибір оптимального методу може залежати від конкретних вимог до даних, а також від обмежень обчислювальної системи.

На цьому етапі розглядаються три основні методи генерації тестових даних:

- генерація за допомогою циклів;
- генерація за допомогою СТЕ;
- генерація за допомогою тимчасових таблиць.

Генерація за допомогою циклів. Є одним з базових підходів до створення тестових даних за допомогою SQL. Суть цього методу полягає у використанні стандартних засобів T-SQL для організації циклічної обробки та поступової генерації даних з подальшою їх вставкою в цільову таблицю бази даних.

Основою реалізації є використання циклу WHILE, який дозволяє багаторазово повторювати групу операторів, поки задана умова залишається істинною. На кожній ітерації циклу формуються значення для атрибутів чергового запису (рядка таблиці), після чого виконується оператор INSERT для додавання запису в таблицю.

Перевагою цього підходу є простота та гнучкість реалізації логіки генерації даних за допомогою стандартних конструкцій мови T-SQL. Розробник може детально налаштувати алгоритм формування значень атрибутів, використання довідникових даних, логіку вставки записів тощо.

Однак генерація циклами має і певні недоліки. Зокрема, через необхідність постійного звернення до БД для вставки чергової порції даних цей метод може демонструвати гіршу продуктивність в порівнянні з іншими методами. Крім того, існує ризик перевантаження транзакційної системи БД при роботі з великими обсягами даних.

Для оптимізації методу генерації циклами слід застосовувати пакетні вставки даних, коли записи акумулюються в окремій структурі, а потім вставляються групою у таблицю. Це зменшує кількість окремих транзакцій. Також важливо використовувати ефективні способи генерації випадкових значень та посилань на довідникові дані.

Отже, генерація за допомогою циклів є універсальним підходом, який дозволяє реалізувати будь-яку логіку обробки даних на T-SQL. Проте цей метод може вимагати оптимізації для досягнення достатньої продуктивності при створенні великих обсягів тестових даних. **Алгоритм методу реалізовано за такими кроками:**

- створюються допоміжні об'єкти для зберігання довідкових даних, таких як списки можливих категорій, брендів тощо. Це можуть бути тимчасові таблиці, табличні змінні або звичайні змінні;
- ініціалізація циклу. Встановлюється лічильник записів та задається максимальна кількість записів для генерування;
- на кожній ітерації генеруються випадкові значення для атрибутів запису (ціна, опис тощо). Обираються випадкові посилання на довідкові дані

(категорія, бренд) з підготовлених таблиць. Формується INSERT-запит для вставки запису у цільову таблицю;

- видалення тимчасових об'єктів. Після завершення циклу видаляються допоміжні таблиці та змінні.

Генерація за допомогою СТЕ. Є ефективним підходом до генерації тестових даних, який дозволяє істотно прискорити цей процес у порівнянні з традиційними циклами. Суть методу полягає у визначенні СТЕ – спеціального об'єкту, який конструє тимчасовий набір результатів для подальшого використання в запиті [7]. На відміну від фізичних таблиць, СТЕ існує тільки під час виконання запиту і не зберігається постійно в базі даних. СТЕ дозволяє реалізувати складну логіку генерації даних в рамках єдиного запиту. Наприклад, за допомогою рекурсивних СТЕ можна ефективно моделювати ієрархічні дані. Інша перевага – швидкість, оскільки дані генеруються "на льоту" [8] без звернень до БД. Після генерації дані з СТЕ однією операцією INSERT вставляються у цільову таблицю. Це значно ефективніше традиційних підходів, де кожен новий рядок вимагає окремої транзакції. Однак СТЕ має деякі обмеження: наприклад, складність реалізації логіки, неможливість повторного використання СТЕ, відсутність підтримки деяких оптимізацій тощо.

Загалом, генерація за допомогою СТЕ є інструментом, що дозволяє істотно прискорити створення тестових даних різної структури та обсягів. Проте він вимагає ретельного підходу, з врахуванням його специфіки та особливостей конкретної СУБД.

Алгоритм методу СТЕ реалізовано за такими кроками:

- створюється СТЕ, яка буде містити генеровані дані для таблиці. Вона оголошується на початку запиту за допомогою ключового слова WITH [8];
- всередині СТЕ створюється рекурсивний підзапит, який ітеративно генерує дані. На кожній ітерації відбувається генерація випадкових значень для основних атрибутів таблиці;
- для генерації значень зовнішніх ключів, які посилаються на інші таблиці, використовуються вкладені підзапити. Вони вибирають випадкові існуючі значення з відповідних таблиць;
- генерація даних відбувається в обмеженій кількості ітерацій, необхідній для отримання бажаної кількості рядків;
- після завершення генерації, дані з СТЕ ефективно вставляються в цільову таблицю Products за допомогою однієї операції INSERT.

Генерація за допомогою тимчасових таблиць. Цей підхід базується на використанні тимчасових таблиць в SQL для проміжного зберігання даних під час генерації. На відміну від звичайних таблиць, тимчасові існують тільки протягом поточного сеансу і автоматично видаляються після завершення роботи [9].

Даний підхід дозволяє оптимізувати процес генерації за рахунок підготовки та зберігання проміжних даних. Однак він також вимагає додаткових ресурсів для тимчасових таблиць та уваги до їх видалення. Для його ефективного застосування слід

використовувати оптимальний розмір пакетів даних, індексацію тимчасових таблиць, зберігання лише необхідних стовпців. Це дозволить отримати певний баланс продуктивності та економії ресурсів при генерації тестових даних.

Отже, використання тимчасових таблиць – метод, який дає змогу оптимізувати процес створення великих наборів тестових даних в SQL за рахунок ефективного використання проміжних результатів. **Алгоритм методу реалізовано за такими кроками:**

- створюються тимчасові таблиці для вибірок категорій і брендів;
- генерується ще одна тимчасова таблиця з випадковими даними для продуктів;
- за допомогою INSERT відбувається вставка даних у цільову таблицю на основі тимчасових;
- після завершення видаляються усі тимчасові таблиці.

Проаналізовані методи генерації даних наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні методи перерозподілу мережних ресурсів

| Методи | Особливості | Переваги | Недоліки |
|--|--|---|--|
| Генерація за допомогою циклів | Використовуються цикли T-SQL (WHILE) [10]; поетапна генерація та INSERT даних в цільову таблицю. | Простота реалізації; можливість детального налаштування [10]. | Велике навантаження на транзакції; повільніший за інші методи. |
| Генерація за допомогою CTE | Використовується конструкція Common Table Expression [11]; генерування та INSERT даних відбувається в одному запиті. | Висока швидкість обробки; Мінімум накладних витрат. | Складніший підхід; Обмежені можливості налаштування [11]. |
| Генерація з використанням тимчасових таблиць | Спочатку формуються тимчасові таблиці [12]; потім виконується INSERT даних в цільову таблицю. | Висока швидкість обробки; гнучке налаштування логіки. | Більш складна реалізація [12]; потреба в очищенні тимчасових таблиць; обмежена кількість генерації випадкових даних. |

На наступних етапах дослідження проведено експериментальне тестування проаналізованих методів генерації даних на основі обраних метрик. Це дозволить зробити обґрунтовані висновки щодо оптимальності кожного методу для різних сценаріїв та обсягів даних.

Критерії оцінювання ефективності методів генерації даних

Для проведення дослідження було визначено ключові метрики для оцінки різних методів генерування тестових даних – швидкість (час) генерації, використання системних ресурсів та масштабованість записів в кожній таблиці БД. Для системного аналізу ефективності методів генерування тестових даних розглядалися такі критерії: час генерації, обсяг згенерованих даних та масштабованість. Час генерації є ключовим показником продуктивності методу, оскільки він відображає здатність оперативно формувати великі обсяги даних, що є необхідним для тестування методів. Обсяг згенерованих даних вказує на використання дискового простору бази даних. Оптимальне використання дискового простору є критичним для великих обсягів даних і тестування навантаження. Цей показник допомагає виявити проблемні точки (вузькі місця) в методах генерування даних. Масштабованість відображає здатність методів підтримувати прийнятну продуктивність при збільшенні обсягів даних. Це є важливим аспектом надійної роботи методів, що генерують великі набори даних.

Отже, детальний аналіз часу виконання, обсягу згенерованих даних та масштабованості різних методів є складовими всебічної оцінки їх ефективності. Поєднання цих критеріїв із раніше визначеними метриками дозволяє комплексно оцінити переваги, недоліки та обмеження кожного методу генерації тестових даних для конкретних сценаріїв використання реляційних баз даних.

Експериментальні дослідження методів генерації даних

Експериментальне тестування є важливим етапом дослідження, оскільки саме на його основі можна об'єктивно порівняти ефективність різних методів генерації тестових даних та визначити оптимальні підходи для конкретних сценаріїв.

Метою цього етапу є емпірична перевірка ефективності трьох проаналізованих раніше методів генерування даних на основі визначених метрик. Для цього було розроблено експериментальну методику, що включає:

- генерацію наборів даних різного обсягу (від 1 до 10 млн рядків, окрім метода тимчасових таблиць, так як в цьому методі використовується обмежена система змінна sys.all_objects для генерації випадкових записів, і цей метод обмежується 5 млн рядків) для заданих таблиць Products, Orders, OrderDetails;
- використання кожного з трьох методів генерації окремо для кожного набору даних таблиць;
- вимірювання часу виконання та обсягу займаного місця в БД;
- порівняння отриманих результатів та їх аналіз.

Вибір трьох таблиць (Products, Orders, OrderDetails) для тестування обумовлений їх ключовою роллю у бізнес-процесах компанії, а також складною структурою та зв'язками, що дозволяє оцінити методи в реалістичних умовах. Обраний діапазон обсягів даних від 1 до 10 млн рядків дає змогу дослідити поведінку алгоритмів як на невеликих, так і на значних масивах даних. Результати експериментів разом з теоретичним оглядом та аналізом дозволять комплексно оцінити їх ефективність та сформулювати конкретні рекомендації щодо їх подальшого використання.

Аналіз результатів для ключової таблиці Products, яка містить інформацію про всі товари компанії, графік часу генерації представлено на рис. 2. Аналізуючи час генерації даних, можна зробити висновок, що метод з використанням рекурсивних СТЕ має певну перевагу.

Наприклад, для генерації 5 млн рядків йому знадобилося 31 сек., а для генерації 10 млн – 1 хв. 58 сек. Це можна пояснити тим, що рекурсивні СТЕ дозволяють значно оптимізувати процес обробки даних, уникаючи непотрібних операцій читання/запису в БД на кожній ітерації.

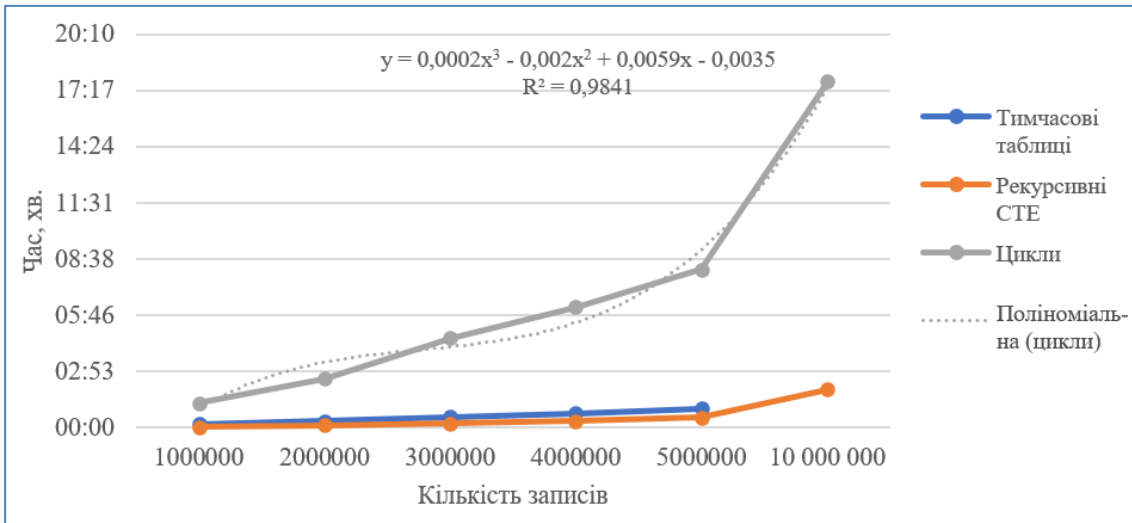


Рис. 2. Графік залежності часу генерації від кількості записів для таблиці Products

Натомість метод з циклами вимагає постійного звернення до БД для запису порції даних, що істотно уповільнює процес. Саме тому на генерацію того ж обсягу даних було витрачено 17 хв. 46 сек.

Метод тимчасових таблиць значно повільніший, а також обмежений у часі генерації ніж рекурсивні СТЕ. Це тому, що тимчасові таблиці також вимагають додаткових операцій читання з БД для збереження проміжних даних. За обсягом займаного місця

перевага у методі тимчасових таблиць – 673 МБ після генерації 5 млн рядків (рис. 3). Це пояснюється тим, що вони зберігають лише необхідні для генерації стовпці на відміну від повноцінних таблиць.

Натомість методи з СТЕ та циклами формують повні табличні дані, що й призводить до більшого обсягу для 5 млн записів – 975 МБ, а для 10 млн – до 1991 МБ у методі СТЕ та 2000 МБ у методі використання циклів.

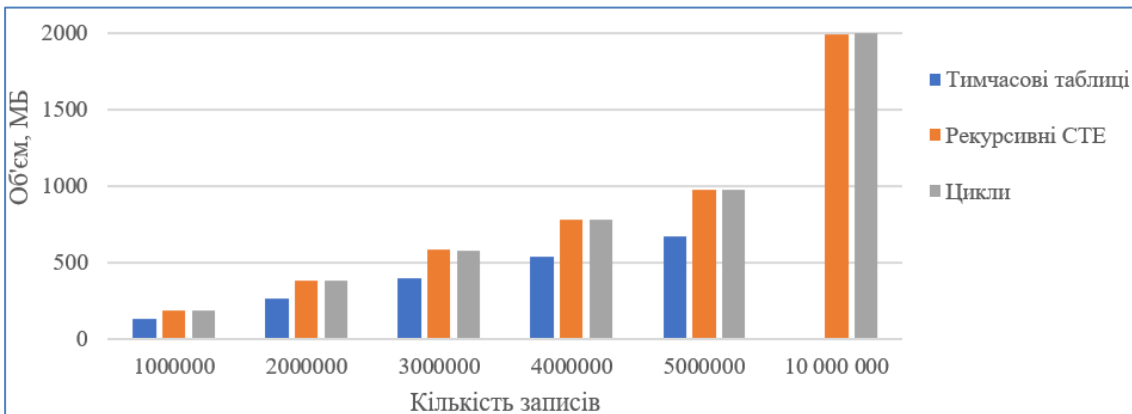


Рис. 3. Графік залежності об'єму згенерованих даних від кількості записів у таблиці Products

Отже, при генерації даних у таблиці Products рекурсивні СТЕ демонструють найкращу швидкість завдяки ефективній обробці даних без зайвих операцій з БД, а що до обсягу даних, тимчасові таблиці мають невелику перевагу. Далі наведено аналіз генерації даних для таблиці Orders. Результати часу генерації для таблиці представлено на рис. 4.

Треба звернути увагу на те, що для таблиці Orders спостерігається подібна тенденція щодо швидкості генерації даних, що і для таблиці Products.

Зокрема, рекурсивні СТЕ показують найкращу швидкість – 32 сек. для 5 млн рядків та 1 хв. 59 сек. – для 10 млн.

Для таблиці Orders різниця між СТЕ та тимчасовими таблицями відрізняється практично на 150%.

Що стосується обсягу згенерованих даних (рис. 5), тимчасові таблиці показують більшу економію місця: різниця у порівнянні з методом СТЕ складає майже 230 МБ на користь тимчасових таблиць для 5 млн записів. Отже, хоча за швидкістю

рекурсивні СТЕ мають перевагу, суттєва економія місця при використанні тимчасових таблиць заслуговує

на увагу, але ж метод з тимчасовими таблицями має певні обмеження щодо об'ємів генерованих даних.

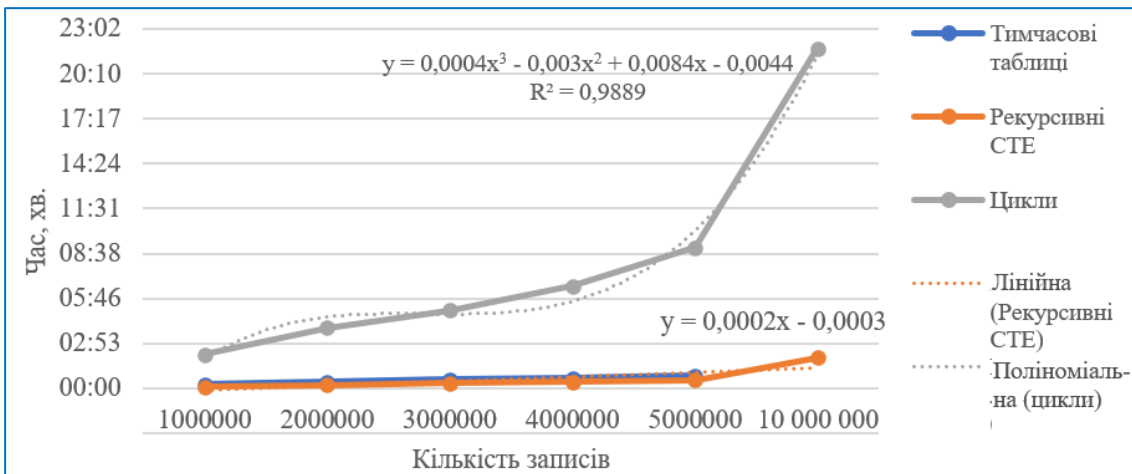


Рис. 4. Графік залежності часу генерації від кількості записів для таблиці Orders

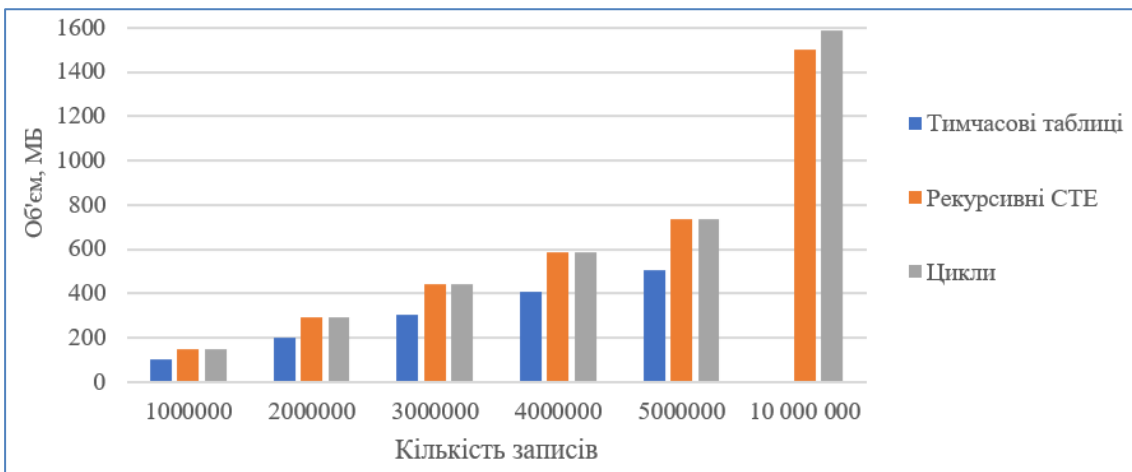


Рис. 5. Графік залежності об'єму згенерованих даних від кількості записів для таблиці Orders

Таблиця OrdersDetails. Результати її генерації – часу генерації даних для цієї таблиці – представлено на рис. 6.

Результати демонструють високу швидкість генерації даних за допомогою рекурсивних СТЕ. На

відміну від попередніх таблиць, ця перевага є більш значною – для генерації 5 мільйонів рядків рекурсивні СТЕ витратили 16 сек., що у 5 разів швидше, ніж метод тимчасових таблиць, та у 16 разів швидше, ніж метод циклів.

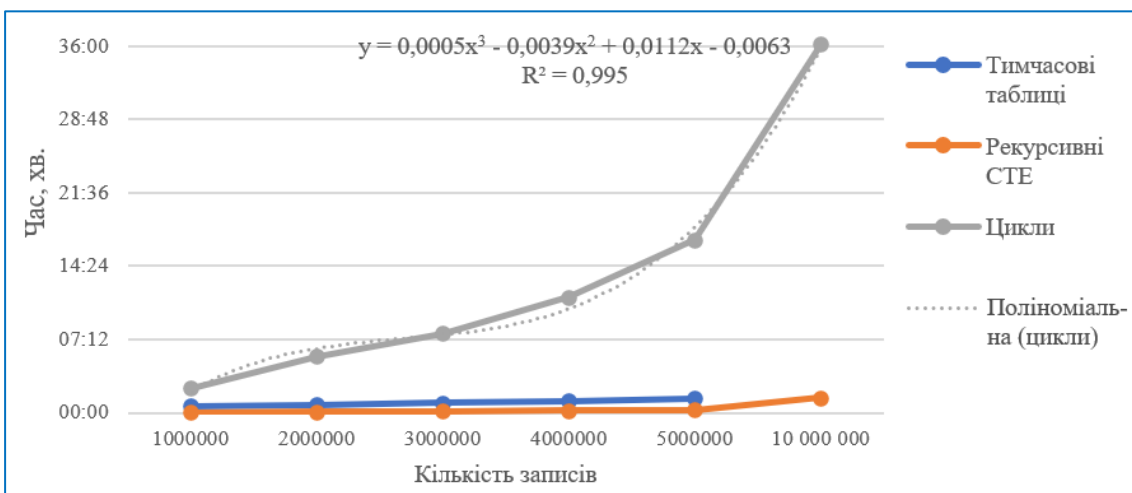


Рис. 6. Графік залежності часу генерації від кількості записів для таблиці OrdersDetails

Такі результати пояснюються особливостями оптимізації запитів в рекурсивних СТЕ.

Вони дозволяють ефективно генерувати складні ієрархічні дані, що й є актуальним для таблиць типу OrdersDetails.

Натомість методи тимчасових таблиць та циклів потребують більше часу через необхідність

створення та обробки проміжних результатів. Це помітно для методу циклів, який витратив майже 17 хв. на той самий обсяг даних. Щодо обсягу згенерованих даних (рис. 7), то рекурсивні СТЕ та тимчасові таблиці продемонстрували схожі результати для 5 млн записів. При використанні методу циклів знадобилось більше місця через генерування повних таблиць.

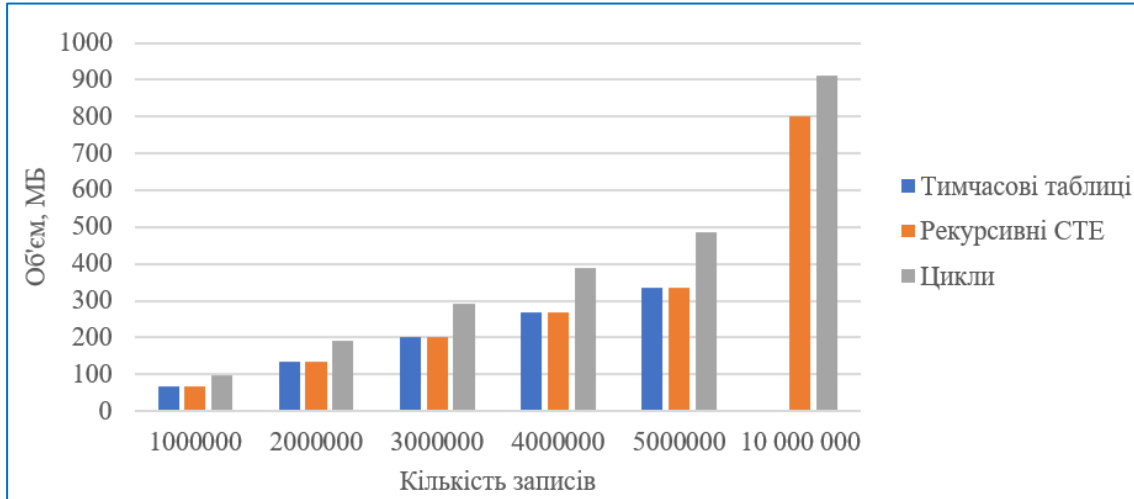


Рис. 7. Графік залежності об'єму згенерованих даних від кількості записів для таблиці OrdersDetails

Отже, для таблиці OrdersDetails найбільш ефективним є метод з рекурсивними СТЕ. Він перевершує інші методи як за часом генерації, так і за економією місця в БД. Це підтверджує високу ефективність методу СТЕ для складних структур даних.

Отже, результати експериментального тестування трьох методів генерації даних для тестових таблиць Products, Orders та OrderDetails визначили на основі метрик ефективності їх використання наступне.

1. Швидкість (час) генерації:

- рекурсивні СТЕ виявилися найефективнішим методом генерації даних для всіх трьох таблиць;
- тимчасові таблиці також демонстрували прийнятну швидкість, але в порівнянні із рекурсивними СТЕ були менш продуктивними, а також є обмеженими щодо обсягів генерації даних;
- циклічний метод виявився значно менш ефективним для великих обсягів даних, особливо для таблиць Orders та OrdersDetails.

2. Використання ресурсів:

- рекурсивні СТЕ економлять ресурси та прискорюють генерацію, оскільки уникають зайвих операцій читання/запису в БД на кожній ітерації;
- тимчасові таблиці потребують додаткових операцій читання/запису для збереження проміжних даних, що призводить до зменшення ефективності в порівнянні з рекурсивними СТЕ;
- циклічний метод вимагає постійного звертання до БД для запису порції даних, що призводить до істотного зниження продуктивності.

3. Масштабованість:

- рекурсивні СТЕ виявили високу масштабованість, зберігаючи ефективність при роботі з різними обсягами даних;

- тимчасові таблиці також забезпечують прийнятну масштабованість, але ж меншу в порівнянні з рекурсивними СТЕ;

- циклічний метод зменшує ефективність при роботі з великими обсягами даних.

4. Обсяг займаного місця в БД:

- тимчасові таблиці ефективно економлять місце в БД, зберігаючи лише необхідні для генерації стовпці;

- рекурсивні СТЕ та метод циклів формують повні табличні дані, що призводить до збільшення обсягу в БД;

- різниця щодо об'єму пам'яті між рекурсивними СТЕ та циклічним методом не є критичною, але доведена ефективність методу тимчасових таблиць щодо збереження даних.

Загалом, результати експериментального дослідження дозволяють зробити висновок, що найбільш універсальним та ефективним підходом до генерації тестових даних для заданих таблиць є використання рекурсивних СТЕ. Цей метод продемонстрував оптимальне поєднання швидкодії (часу генерації), економії ресурсів, масштабованості та надійності. Переваги рекурсивних СТЕ полягають в ефективній оптимізації запитів, уникненні зайвих операцій з БД та високої гнучкості до структури і обсягу даних. Це робить їх найбільш придатним інструментом для генерації як простих, так і складних ієрархічних даних в широкому діапазоні їх масштабованості.

Циклічний метод виявився найменш продуктивним та ресурсоемним. Отже, його можна рекомендувати лише для невеликих обсягів простих даних через низьку масштабованість.

Таким чином, можна зробити висновок, що рекурсивні СТЕ є оптимальним універсальним

інструментом генерації тестових даних для задач тестування та навантаження реляційних БД.

Висновки

У даній роботі досліджено актуальну проблему генерації тестових даних великих обсягів для завдань тестування та оптимізації роботи реляційних баз даних.

За результатами експериментального порівняльного тестування методів на основі ключових метрик ефективності (часу генерації, витрат ресурсів, масштабованості) обґрунтовано, що найбільш ефективним є метод рекурсивних CTE.

Цей метод продемонстрував оптимальне поєднання швидкодії, економії ресурсів та надійності для широкого діапазону обсягів і структур даних. Водночас, за певних умов, доцільно поєднувати переваги

різних методів: зокрема, тимчасові таблиці можуть застосовуватися для економії місця при середніх обсягах даних, а циклічний метод є обмежено придатним, зокрема для невеликих простих наборів даних.

Таким чином, проведене дослідження надає комплексне уявлення про можливості та обмеження різних методів генерації даних у реальних умовах їх застосування.

Результати даного дослідження надають рекомендації щодо їх використання для генерації тестових даних на хмарних платформах – наприклад, для тестування сервісів Azure SQL Database та Azure WebApp + SQL Database хмарної платформи Azure для прийняття рішень щодо вибору оптимального рівня моделей DTU та vCore при моделюванні процесів генерації даних та створенні запитів різної складності у реляційних БД [13].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Synthetic Data Generation [Електронний ресурс] // AI Multiple. – Режим доступу: <https://research.aimultiple.com/synthetic-data-generation/>. – Дата звернення: 02.03.2024.
2. Unit Testing: Generate Test Data Sets SQL Server Database Applications [Електронний ресурс] // MSSQLTips. – Режим доступу: <https://www.mssqltips.com/sqlservertip/7766/unit-testing-generate-test-data-sets-sql-server-database-applications/>.
3. Houkjar K., Torp K., Wind R. Simple and Realistic Data Generation // Very Large Data Base Endowment Inc. (VLDB Endowment). 2006. С. 1243-1246. – Режим доступу: <https://www.vldb.org/conf/2006/p1243-houkjar.pdf> /.
4. WHILE (Transact-SQL) [Електронний ресурс] // Microsoft Learn. – Режим доступу: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/sql/t-sql/language-elements/while-transact-sql?view=sql-server-ver16>.
5. Common Table Expressions (CTEs) vs Temporary Tables in BigQuery [Електронний ресурс] // Medium. – Режим доступу: <https://medium.com/@sahaabhik9/common-table-expressions-ctes-vs-temporary-tables-in-bigquery-f6057e688f01>.
6. Сергій Мінухін, Мирослав Башкіров. Моделювання роботи з базами даних торговельних компаній на хмарних платформах // Інформаційні системи та технології: матеріали 12-ої Міжнародної науково-технічної конференції. Частина 2. Молодіжна секція, Харків, (28 листопада 2023 – 01 грудня 2023 р.) / наук. ред. В.В. Безкоровайний, Л. Petryshyn, З.В. Дудар, Ю.В. Мішераков.: ХНУРЕ, 2023. – С.45–47.
7. Common Table Expressions (CTE) [Електронний ресурс] // dbschema.com. 2023. – Режим доступу: <https://dbschema.com/2023/07/02/sqlserver/common-table-expressions/>.
8. Stuparu D., Petrescu M. Common Table Expression: Different database systems approach. Journal of Computer-Mediated Communication. 2009. Vol. 6, No. 3. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/259441876_Common_Table_Expression_Different_database_systems_approach.
9. Which are more performant: CTE or Temporary Tables? [Електронний ресурс] // Stack Overflow. – Режим доступу: <https://stackoverflow.com/questions/690465/which-are-more-performant-cte-or-temporary-tables>.
10. T-SQL WHILE Loop – GOTO Loop Time Series Data [Електронний ресурс] // MSSQLTips. – Режим доступу: <https://www.mssqltips.com/sqlservertip/7139/t-sql-while-loop-goto-loop-time-series-data/>.
11. WITH common_table_expression (Transact-SQL) [Електронний ресурс] // Microsoft Learn. – Режим доступу: <https://learn.microsoft.com/en-us/sql/t-sql/queries/with-common-table-expression-transact-sql?view=sql-server-ver16>.
12. SQL Temp Table: How to Create a Temporary SQL Table [Електронний ресурс] // freeCodeCamp.org. – Режим доступу: <https://www.freecodecamp.org/news/sql-temp-table-how-to-create-a-temporary-sql-table/>.
13. Minukhin S. Performance study of the DTU model for relational databases on the Azure platform // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – 2022. – №. 1 (19). – С. 27-39. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.19.027>.

Received (Надійшла) 12.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.04.2024

to research the effectiveness of test data generation methods in relational databases

S. Minukhin, M. Bashkirov

Abstract. The article analyzes three main methods of generating test data for relational databases: cyclic, based on Common Table Expressions (CTE) and using temporary tables. Experimental testing was carried out in the MS SQL Server environment on the example of database tables of a trading company. A comparison was made by key metrics of generation efficiency - generation time, system resource utilization, and scalability of the test database tables. The results of the study substantiated the effectiveness of the recursive CTE method for different volumes and data structures. Recommendations for choosing test suite generation methods in accordance with the requirements of database projects, in particular when using services for working with relational databases on cloud platforms, are given.

Keywords: Database, Microsoft SQL Server, Testing, Database generation, T-SQL, Optimization, Recursive queries, Temporary Tables, Generation with Loops.

Д. С. Ніколаєнко, Т. В. Філімончук, Г. В. Майстренко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МОДЕЛЬ ОБРОБКИ СПЕКТРАЛЬНИХ ДАНИХ АСТРОНОМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Анотація. Актуальність. На даний час існує напрям, який пов'язано з оптимізацією обробки даних астрономічних об'єктів, зокрема спектральних даних, що отримуються за допомогою радіотелескопів. Об'єм даних, котрий необхідно обробити, представляє собою однорідний потік інформації, який можна обробляти за допомогою розподілених обчислень, таким чином збільшивши швидкість обробки на доволі значну величину. **Метою даної роботи** є побудова моделі обробки спектральних даних астрономічних об'єктів з використанням розподілених обчислень. **Об'єктом дослідження** є процес обробки спектральних даних, які було отримано від астрономічних об'єктів. **Предметом дослідження** є існуючі на даний час моделі та методи обробки спектральних даних. **Результати.** Запропонована модель обробки спектральних даних астрономічних об'єктів, яка рекомендує використовувати розподілені алгоритми обробки та спеціалізоване програмне забезпечення, а саме середовище CUDA та бібліотеку OpenCV для зменшення часу обробки великих масивів даних та більш раціонального використання потужностей обчислювальних ресурсів. **Висновок.** Використання запропонованого інструментарію у моделі дозволяє покращити та пришвидшити обробку спектральних даних астрономічних об'єктів за допомогою розподілених алгоритмів.

Ключові слова: спектральний аналіз, паралельні та розподілені обчислення, обробка великих даних, швидкодія.

Вступ

Людство завжди прагнуло дослідити та проаналізувати небо, виявити закономірності, явища небесних об'єктів, дослідити самі об'єкти. З плином часу прості дослідження неба стали повноцінною наукою – астрономією. Астрономія вже давно перестала бути виключно наукою оптичних спостережень. Минуле століття дало великий поштовх розвитку всіх наукових сфер, які використовуються в наш час як інструментарій для досліджень неба та його явищ: фізика, хімія, географія, комп'ютерні технології.

Створення радіотелескопу в середині 20-го століття дало великий поштовх розвитку астрономії, так як тепер науковці мають змогу бачити випромінювання об'єктів не тільки в оптичному діапазоні, а й в інших. Проте, науковці стикаються з іншою проблемою: обробкою даних, які було отримано. Одними з типів даних, які отримуються з радіотелескопів є спектральні дані. У зв'язку з цим, сучасна астрономія все більше спирається на передові комп'ютерні технології та інноваційні методи обробки даних [1, 2]. Використання графічних процесорів (GPU) стало революційним кроком у цьому напрямку. GPU дозволяють проводити обчислення з високою ступенем паралелізму, що кардинально змінює підходи до обробки великих обсягів даних, отриманих від небесних спостережень. На даний час для оптимізації процесу обробки спектральних даних використовуються комп'ютерні технології [3]: науковці досліджують існуючі моделі, програми та алгоритми обробки, намагаючись створити новий, більш оптимізований підхід до їх аналізу.

Метою роботи є побудова моделі обробки спектральних даних астрономічних об'єктів за допомогою розподілених обчислень.

Результати досліджень

Актуальні засоби обробки. На даний час найпопулярнішим середовищем для аналізу та обробки спектральних даних астрономічних об'єктів є середовище Image Reduction and Analysis Facility (IRAF)

[4], яке було створено у 80-х роках для швидкої та оптимальної обробки даних, отриманих від астрономічних об'єктів. Мовою програмування середовища IRAF є Python, а для математичних обчислень використовується бібліотека Astropy [5]. Середовище являє собою потужний програмний пакет, розроблений для використання в астрономії та астрофізиці, призначений для полегшення роботи з даними, та надає зручні інструменти для виконання широкого спектру задач: від базових обчислень та обробки зображень до більш складних операцій, таких як управління астрономічними координатами, часом та моделюванням.

Бібліотека Astropy надає розширені можливості для аналізу спектральних даних, що є невід'ємною частиною сучасних астрономічних досліджень. Вона дозволяє вченим легко обробляти, аналізувати та інтерпретувати спектральну інформацію, яка була отримана в наслідок астрономічних спостережень.

Важливим фактором використання IRAF та Astropy є можливість зчитувати та обробляти формат Flexible Image Transport System (FITS), який є найбільш популярним для збереження характеристик сигналу з радіотелескопів для подальшого опрацювання. FITS являє собою відкритий стандарт, який визначає цифровий формат файлу корисний для зберігання, передачі та обробки даних: у форматі багатовимірних масивів (наприклад, 2D-зображення) або таблицях. Слід зазначити, що FITS є найбільш поширеним форматом файлів, який використовується в астрономії і містить такі дані: опис фотометричної та просторової калібрувальної інформації разом з оригінальними метаданими зображення.

Формат IRAF підтримується до сих пір, проте він використовує послідовні алгоритми обробки на процесорі. Такий підхід накладає значні обмеження на швидкодію обробки даних, особливо в контексті “любительської” астрономії. Велика потужність потребується від комп'ютерної системи, щоб обробляти такий великий потік даних в реальному часі. Обробка одного файлу FITS на доволі посередніх комп'ютерах може зайняти більше кількох хвилин,

що є доволі довгим процесом, враховуючи те, що один такий файл містить дані про об'єкт в конкретний момент часу. Головною задачею моделі, що пропонується, є прискорення швидкості обробки даних у форматі FITS за рахунок максимально швидкого проходження по масиву спектральних даних з застосуванням до кожного елементу математичні функції (аналогічно бібліотеці *Astropy*) з використанням розподілених обчислень.

Технологічна база. Складність обчислювань вимагає різкого збільшення ресурсів та швидкодії комп'ютерів. Найбільш перспективним напрямком збільшення швидкості розв'язання є широке впровадження ідей паралелізму у роботу обчислювальних систем. Сьогодні спроектовано та випробувано сотні різних комп'ютерів, що використовують у своїй архітектурі той чи інший вид паралельної обробки даних. Основна складність при проектуванні паралельних програм – забезпечення правильної послідовності взаємодій між різними обчислювальними процесами, а також координація ресурсів, що розділяються між ними. Для прискорення обробки масиву спектральних даних було обрано найпопулярнішу програмну архітектуру від *Nvidia CUDA* [6]. *CUDA* – це програмно-апаратна архітектура паралельних обчислень, яка дозволяє істотно збільшити обчислювальну продуктивність завдяки використанню графічних процесорів *NVIDIA*. При використанні цієї технології слід орієнтуватися на таку термінологію:

- пристрій (*device*) – сама відеокарта, графічний процесор (*GPU*), який виконує команди центрального процесора;

- хост (*host*) – центральний процесор (*CPU*), який запускає різноманітні завдання на пристрої, виділяє пам'ять;

- ядро (*kernel*) – завдання, що буде виконуватися на *GPU*.

CUDA дозволяє програмістам реалізувати на спеціальному спрощеному діалекті мови програмування *C* алгоритми, що виконуються на графічних процесорах *Nvidia*, і включати спеціальні функції в текст програми на *C*. Архітектура *CUDA* дає розробнику можливість на свій розсуд організувати доступ до набору інструкцій *GPU* й управляти його пам'яттю. Дана технологія підтримує декілька мов програмування. Серед них є *Java*, *Python*, *C/C++*.

Для запуску розподіленого алгоритму обробки спектральних даних слід використовувати наступні інструменти:

- бібліотеку *OpenCV* відкритого коду, яка призначена для надання спільної інфраструктури для застосунків комп'ютерного зору та прискорення використання перцепції машин у комерційних продуктах;
- середовище *Microsoft Visual Studio*;
- мову програмування *C++*.

Бібліотека *OpenCV* містить в собі алгоритми обробки даних, які орієнтовано на розподілені обчислення з подальшим використанням їх у середовищі *CUDA*. Також слід зазначити, що бібліотека містить математичні утиліти, аналогічні *Astropy*.

Модель обробки спектральних даних. На даний час існує модель обробки спектральних даних,

яка може бути описана за допомогою кортежу (1), де *D* – датасет спектральних даних, *S* – програмне забезпечення, яке приймає участь в обробці датасету даних, *SA* – послідовний алгоритм обробки датасету. Наведена модель має низку недоліків і головними із них – це використання застарілого програмного забезпечення та бібліотек котрі не містять в собі змогу обробляти дані розподілено.

$$MP_{SD} = \{D, S [IRAF, Astropy], SA\} \quad (1)$$

Щоб уникнути зазначених недоліків, запропоновано нову модель (2), яка рекомендує використовувати розподілені алгоритми обробки (*DA*) та спеціалізоване програмне забезпечення, а саме середовище *CUDA* та бібліотеку *OpenCV*, які дозволяють значно покращити обробку спектральних даних астрономічних об'єктів за рахунок використання розподілених обчислень.

$$MP_{SD} = \{D, S [CUDA, OpenCV], DA\} \quad (2)$$

У порівнянні з послідовним алгоритмом, де дані обробляються послідовно один за одним, розподілений дозволяє реалізувати одночасну обробку, знижуючи загальний час обчислень та підвищуючи продуктивність. Таким чином, нова модель забезпечує більш ефективне використання обчислювальних ресурсів, відкриваючи шлях до більш глибокої та швидкої обробки астрономічних даних.

Алгоритм обробки датасету спектральних даних складається з таких кроків (рис. 1):

- 1) в проект реалізації необхідно додати *OpenCV* бібліотеку;

- 2) модель отримує дані для обробки;

- 3) використовуючи паралельні та розподілені обчислення здійснюється обробка спектральних даних об'єкта (бібліотека *OpenCV* містить методи для роботи з форматом *FITS*);

- 4) частину результатів доцільно наводити у вигляді графіків (частотний спектр) іншу слід подати у текстовому форматі (характеристика хвиль);

- 5) запис даних у будь-який текстовий документ чи створення власного формату збереження для відтворення у програмі.

Алгоритм роботи моделі, яка орієнтована на розподілені обчислення, використовує такі методи бібліотеки *OpenCV*:

- методи перетворення Фур'є (*FFT*): дозволяють аналізувати спектральні компоненти даних. Використання *FFT* в *CUDA* може значно прискорити обчислення за рахунок паралельної обробки даних;

- фільтрація Гауса (*Gaussian Blurring*): використовується для згладжування зображення шляхом застосування Гаусового ядра. Цей метод можна за-



Рис. 1. Алгоритм роботи моделі, яка орієнтована на розподілені обчислення

стосувати для попередньої обробки спектральних даних, щоб зменшити шум та підготувати дані для подальшого аналізу (реалізація Гаусового згладжування в CUDA може значно покращити швидкість обробки великих наборів даних);

- краєве виявлення (Edge Detection): методи, такі як оператор Собеля, можуть використовуватися для виявлення країв астрономічних об'єктів в спектральних даних (паралельна обробка даних за допомогою CUDA може забезпечити швидке виявлення країв в великих наборах даних);

- морфологічні операції: включають дилатацію та ерозію, які можуть використовуватися для корекції форми астрономічних об'єктів у спектральних даних (ці методи можуть допомогти покращити виділення та аналіз структур, роблячи їх більш виразними для подальшого дослідження);

- нормалізація: вона допомагає згрупувати дані з подібним діапазоном значень, що є критично важливим для порівняльного аналізу різних спектральних зображень);

- паралельна обробка даних: розбиття даних на менші блоки для паралельної обробки дозволяє максимально використовувати обчислювальні ресурси GPU. Важливо розробити алгоритм таким чином, щоб він міг ефективно масштабуватися залежно від кількості доступних потоків.

Під час реалізації алгоритмів обробки даних на CUDA важливо ефективно використовувати пам'ять GPU, щоб мінімізувати затримки доступу до даних. Використання різних рівнів кешування та розумне управління пам'яттю може значно підвищити продуктивність.

Припустимо, що маємо дві моделі, одна з яких робить послідовну обробку, інша – розподілену та має 10 ядер, доступних для обробки. Тоді, якщо на

обробку одного файлу уходить одна хвилина, то послідовна модель буде обробляти один файл за хвилину, коли паралельна – 10 файлів за хвилину.

Висновки

В результаті проведених авторами досліджень було розглянуто актуальні методи та інструменти для аналізу спектральних даних астрономічних об'єктів, приділено увагу використанню середовища IRAF та бібліотеки Astropy, які залишаються важливими інструментами в для ефективного аналізу даних. Також було наголошено про актуальність паралельних та розподілених обчислень на платформі CUDA, що відіграють критичну роль в оптимізації обробки великих обсягів даних, отриманих з радіотелескопів.

На основі аналізу існуючих підходів та інструментів було обґрунтовано необхідність використання інструментів, які реалізують можливості паралельних обчислень. Запропонована модель обробки спектральних даних відкриває нові горизонти для підвищення ефективності обробки спектральних даних, які отримано з радіотелескопів та збережено у форматі FITS. Використання паралельних обчислень дозволяє значно зменшити час, необхідний для обробки великих даних, що є ключовим для прискорення наукових досліджень. Рекомендована модель, що ґрунтується на паралельних обчисленнях, пропонує ефективний спосіб вирішення цієї задачі. Вона не тільки сприяє підвищенню швидкості обробки даних, але й відкриває нові можливості для глибшого розуміння структури Всесвіту та динаміки небесних явищ.

Майбутні дослідження в цій галузі можуть включати подальше вдосконалення алгоритмів паралельної обробки, розширення функціоналу інструментів, що використовуються, а також адаптацію моделі для нових областей застосування в астрономії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Подорожняк А.О., Гриб Р.М., Домнін С.В. (2013), "Морфологічна обробка цифрових зображень з телескопів", Сучасна спеціальна техніка, № 1(32), С. 34-39.
2. Бандурка О.І., Свинчук О.В. (2022), "Метод ідентифікації космічних знімків для прогнозування лісових пожеж", Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, Т. 1 (67). С. 13-18. doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.1.013>.
3. Анисенко О.В. (2017), "Розвиток дистанційного зондування землі в Україні", Агросвіт, № 7, С. 52-59.
4. IRAF 2.17.1. IRAF Community Distribution. URL: <https://iraf-community.github.io>
5. Astropy. URL: <https://www.astropy.org>
6. CUDA Toolkit - Free Tools and Training. NVIDIA Developer. URL: <https://developer.nvidia.com/cuda-toolkit>

Received (Надійшла) 26.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.04.2024

MODEL FOR PROCESSING SPECTRAL DATA OF ASTRONOMICAL OBJECTS

Dmytro Nikolaienko, Tetiana Filimonchuk, Halyna Maistrenko

Abstract. Topicality. Currently, there is a direction that is related to the optimization of data processing of astronomical objects, in particular, spectral data obtained with the help of radio telescopes. The amount of data that needs to be processed is a homogeneous flow of information that can be processed using distributed computing, thus increasing the speed of processing by a fairly significant amount. **The purpose of this work** is to build a model for processing spectral data of astronomical objects using distributed computing. **The object of research** is the process of processing spectral data obtained from astronomical objects. **The subject of the study** is currently existing models and methods of spectral data processing. **Results.** A model for processing spectral data of astronomical objects is proposed, which recommends the use of distributed processing algorithms and specialized software, namely the CUDA environment and the OpenCV library to reduce the processing time of large data sets and more rational use of computing resources. **Conclusion.** The use of the proposed tool in the model allows to improve and speed up the processing of spectral data of astronomical objects using distributed algorithms.

Keywords: spectral analysis, parallel and distributed computing, big data processing, high-speed code.

Б. Р. Попович, Г. Е. Заволодько

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

ВПРОВАДЖЕННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В TESTHUB

Анотація. Стаття аналізує інноваційний підхід до онлайн тестування через інтеграцію штучного інтелекту в TestHUB, платформу, яка автоматизує створення тестів. Завдяки проведеному експерименту доведено, що викладачі тепер можуть швидко генерувати питання, що відповідають певним навчальним критеріям, тим самим підвищуючи ефективність навчального процесу. Сервіс дозволить адаптувати тести до індивідуальних потреб студентів, спрощує підготовку та розширює можливості для креативного підходу до навчання. Стаття детально розглядає складові системи TestHUB, її модулі та алгоритми, а також представляє результати тестування функціональності платформи. Підкреслено важливість інтеграції штучного інтелекту в освітній процес, наголошуючи на поліпшенні якості навчання та зменшенні навантаження на викладачів.

Ключові слова: онлайн тестування, штучний інтелект, оцінювання знань, освітні технології, персоналізовані тести, алгоритми ШІ, модулі системи, аналіз функціональності.

Вступ

Сучасна освіта постійно шукає ефективні методи оцінки студентських досягнень, серед яких вирізняються усний, письмовий, тестовий та самоконтроль. Особливу увагу приділяється тестуванню, що дозволяє об'єктивно оцінити рівень засвоєння матеріалу завдяки його ефективності, швидкості отримання результатів та можливості забезпечити однакові умови для всіх учасників.

Тестування має свої недоліки, але є визнаним методом контролю знань, що сприяє розвитку критичного мислення та підготовці студентів до реального життя [1-6].

Платформа TestHUB відкриває нові горизонти в онлайн тестуванні, пропонуючи революційний підхід до створення тестів. Використання штучного інтелекту для генерації питань перетворює цей процес з трудомісткої роботи в ефективну та творчу діяльність. Вчителі, які раніше витрачали години на формулювання тестів, тепер можуть покладатися на TestHUB, щоб створювати якісні тести швидко та без зайвих зусиль.

Штучний інтелект TestHUB здатен аналізувати навчальний матеріал та генерувати запитання, які відповідають зазначеним критеріям, враховуючи різноманітні аспекти вивчення матеріалу. Він може автоматично створювати різні типи тестів, починаючи від множинного вибору до складних аналітичних завдань, адаптуючи їх до індивідуальних потреб кожного студента.

Така персоналізація є ключем до ефективного навчання, оскільки вона дозволяє студентам розвивати свої знання та навички в оптимальному темпі.

Помічник на базі штучного інтелекту та його роль у вирішенні проблем

Завдяки використанню алгоритмів машинного навчання, ШІ може аналізувати навчальний контент та виробляти питання, які найбільш точно відображають визначені вчителем критерії.

Цей підхід не тільки забезпечує різноманітність тестів, але й гарантує, що питання будуть відповідати конкретним освітнім цілям і рівню студентів.

Вчителі мають можливість керувати складністю тестів, темами та навіть стилем запитань, що робить тестування максимально адаптованим до особливостей кожного класу або курсу [7-9].

Така технологія значно знижує навантаження на вчителів, оскільки зменшує час, необхідний для підготовки тестів, і дозволяє їм зосередитися на більш творчих та важливих аспектах навчального процесу.

Вона також сприяє більшій справедливості тестування, оскільки кожен студент отримує тест, який відповідає його навчальному рівню та потребам.

Крім того, штучний інтелект в TestHUB вносить значний вклад у персоналізацію навчання. Він може враховувати індивідуальні особливості кожного студента, їх попередні результати та прогрес, щоб запропонувати тест, який найкраще підходить для перевірки та розвитку їх знань та навичок.

Це сприяє глибшому засвоєнню матеріалу та мотивації студентів, оскільки тестування стає більш релевантним та цікавим для них.

Структура взаємодії між різними користувачами платформи, базою даних та API TestHUB описана далі.

Три основні типи користувачів платформи — викладачі, студенти та адміністратори — мають різні рівні доступу та можливості на платформі.

Викладачі мають найбільший спектр можливостей, включаючи перегляд, перегляд своїх тестів, генерацію тестів, створення курсів, публікацію тестів та авторизацію.

Вони також можуть прив'язувати тести до курсів і передавати всі тести, що відносяться до певного курсу.

Студенти мають можливість проходити тести, вступати на курси та переглядати всі доступні тести. Вони також можуть реєструватися на платформі та здійснювати запити на тестування. Адміністратори займаються технічним керуванням тестами, включаючи їх реєстрацію та забезпечення тестів. Вони мають доступ до більш технічних аспектів платформи, таких як база даних та API TestHUB.

Центральним елементом схеми є база даних, до якої всі користувачі відправляють дані через свої дії

на платформі. База даних взаємодіє з TestHUB API, який, можливо, забезпечує інтеграцію з зовнішніми ресурсами або сервісами.

Кожна дія на схемі представлена лінією, що з'єднує користувача з конкретним функціоналом або ресурсом платформи.

Алгоритмічна складова TestHUB

Один з ключових алгоритмів платформи – це інтелектуальний алгоритм вибору запитань, який в автоматичному режимі аналізує введені користувачем параметри та відбирає найбільш релевантні питання з великої бази даних.

Алгоритм оцінює кожне питання на відповідність заданим критеріям, включаючи тип питання, теги, складність та інші характеристики. На основі комплексного балу питання впорядковуються за релевантністю, формуючи оптимізований список для конкретного тесту.

Другий значущий алгоритм – генерація та парсинг питань за допомогою штучного інтелекту. Цей алгоритм забезпечує генерування нових питань, заснованих на інструкціях та даних, наданих користувачем.

Застосування штучного інтелекту дозволяє створювати унікальні та якісні питання, які можуть містити різноманітні формати та контексти, забезпечуючи багатогранність та глибину тестових завдань.

Окремою увагою заслуговує запит до штучного інтелекту у TestHUB, який активує процес генерації питань.

Запит формулюється з урахуванням всіх необхідних параметрів, відповідно до яких штучного інтелекту створює запитання. Результатом є структурована відповідь у форматі JSON, що відповідає всім вимогам користувача.

Описані алгоритми становлять основу для інтуїтивного інтерфейсу TestHUB, який дозволяє викладачам з легкістю створювати, редагувати та керувати тестами. Це не тільки сприяє зручності та швидкості створення тестів, але й підвищує якість освітнього контенту завдяки точному та персоналізованому підходу.

Автоматизація створення питань на базі відповідей штучного інтелекту. Отримавши позитивну відповідь від штучного інтелекту API, наступним етапом є парсинг структурованої відповіді у форматі json.

Цей процес відіграє ключову роль у витягненні відомостей, необхідних для створення питання, а також його відповідей.

Після парсингу інформації з отриманого json, відбувається створення запису Питання разом із відповідями, які стосуються цього конкретного питання. Ця дія включає в себе збереження даних в базу даних інструменту.

Динамічне відображення новоствореного питання на сторінці створення тестів реалізовано у блоці "Питання".

Це надає користувачеві можливість бачити, як саме виглядатиме питання у контексті тесту, дозволяючи відразу оцінювати його адекватність до

вихідних параметрів та форми питань, яку він мав би представляти.

Такий підхід дозволяє забезпечити користувачу швидкий та зручний перегляд питань, покращуючи ефективність процесу створення тестів у TestHUB.

Система TestHUB представляє собою комплексний набір модулів, кожен з яких виконує специфічну роль у процесі організації тестування та оцінювання знань студентів. Ці модулі взаємодіють між собою для створення злагодженої системи, яка забезпечує ефективність, гнучкість та точність у процесі навчання.

Модуль підбору питань пропонує автоматизоване рішення для вибору питань на основі визначених параметрів, забезпечуючи тим самим створення індивідуалізованих тестів, що відповідають освітнім потребам і рівням складності.

Модуль збереження результатів тестування відповідає за надійне зберігання даних про результати тестів студентів, надаючи викладачам доступ до важливої інформації для аналізу та оцінювання.

Модуль адміністрування забезпечує інтерфейс для управління платформою, включаючи можливості налаштування прав доступу, створення користувачів, моніторингу та контролю над системними параметрами.

Модуль інтеграції зі сторонніми системами відкриває широкі можливості для обміну даними з іншими платформами, розширюючи таким чином функціонал TestHUB і поліпшуючи взаємодію всередині освітнього середовища.

Модуль генерації питань від штучного інтелекту використовує передові технології для створення нових тестових питань, що робить процес навчання більш динамічним і змістовним.

Модуль реєстрації користувачів спрощує процес входу нових користувачів у систему, надаючи їм можливість доступу до освітніх ресурсів та тестів.

Модуль авторизації користувачів забезпечує безпеку та конфіденційність даних, контролюючи процес входу на платформу.

Модуль створення, перегляду та редагування тестів надає викладачам інструменти для ефективної підготовки та адаптації тестів, відповідно до змін у навчальних програмах або з урахуванням індивідуальних потреб студентів.

Модуль аналізу результатів тестування відіграє критичну роль у забезпеченні об'єктивного оцінювання, аналізуючи і представляючи результати в зручній формі для подальшого аналізу та рефлексії викладачем.

Цей модуль може допомогти в ідентифікації тенденцій, визначенні сильних та слабких сторін учнівського навчання та розробці стратегій для подальшого педагогічного розвитку.

Кожен з цих модулів є важливою складовою у створенні єдиної системи, що дозволяє TestHUB функціонувати як повноцінний інструмент. Впровадження модульної системи TestHUB може суттєво

поліпшити якість освіти, забезпечуючи викладачам сучасні інструменти для ефективного навчання та оцінювання.

Тестування помічника на базі штучного інтелекту

TestHUB відіграє ключову роль у трансформації сучасного освітнього процесу, пропонуючи інноваційні рішення для автоматизації створення тестів і адміністрування з використанням штучного інтелекту (ШІ).

Розробка та впровадження такої платформи вимагає глибокого розуміння потреб освітньої сфери та викликів, з якими стикаються викладачі та студенти в процесі навчання та оцінювання.

Ключовим елементом TestHUB є помічник на базі штучного інтелекту, здатний генерувати тестові завдання, адаптувати їх під різні дисципліни та рівні складності.

Ефективність помічника була доведена через комплексне тестування, яке включало аналіз точності відповідей, оцінку швидкості обробки запитів та здатність адекватно реагувати на непередбачувані ситуації.

Результати тестування показали, що помічник на базі штучного інтелекту демонструє високий рівень точності та ефективності, вказуючи на його значний потенціал у покращенні процесу тестування в освіті. Впровадження асинхронних запитів до штучного інтелекту дозволило підвищити продуктивність платформи, забезпечуючи її стабільну роботу навіть при високому навантаженні.

Тестування навантаження виявило, що платформа спроможна ефективно обробляти велику кількість одночасних запитів, що робить її надійним

інструментом для масового використання в освітніх закладах.

Одним з головних пріоритетів розробки TestHUB було створення інтуїтивно зрозумілого та зручного інтерфейсу, який би відповідав потребам як викладачів, так і студентів. Відгуки користувачів і результати тестування використовувалися для постійного удосконалення платформи, адаптації її функціоналу та інтерфейсу до змінних вимог освітнього процесу.

Розробка та впровадження TestHUB підкреслює потенціал штучного інтелекту в освітньому секторі, демонструючи, як технології можуть сприяти покращенню якості навчання та оцінювання.

Використання штучного інтелекту як помічника для автоматизації створення тестів забезпечує ефективність, точність та індивідуалізацію навчального процесу, відповідаючи на виклики сучасної освіти.

Перспективи розвитку TestHUB обнадійливі, оскільки платформа відкриває нові можливості для інновацій у навчанні та оцінюванні

Висновки

Автоматизація створення тестів з використанням штучного інтелекту сприяє ефективності, точності та персоналізації навчання, відповідаючи на сучасні освітні виклики.

Особлива увага приділяється інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу, розробленому з урахуванням потреб користувачів, що сприяє покращенню якості навчання.

Перспективи розвитку TestHUB вважаються обнадійливими завдяки новим можливостям для інновацій у навчанні та оцінюванні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мороховець Г. Ю. Тестування як форма контролю та діагностики знань здобувачів вищої освіти. Освіта та розвиток обдарованої особистості. Освіта та розвиток обдарованої особистості. № 3(70). 2018. С. 11–15..
2. Скрипник В. О. Роль тестування в сучасній освіті // Наукові записки. – 2017. – № 2. – С. 24-28.
3. Бондаренко Н. В. Цілі та завдання тестування // Освіта і наука. – 2015. – № 3. – С. 25-28.
4. Кириленко Н. В. Методи тестування // Педагогіка та психологія. – 2016. – № 4. – С. 26-29.
5. Андрос М. С. Тестування як елемент ефективності дистанційного навчання / Мирослав Євгенійович Андрос. // Післядипломна освіта в Україні. – 2017. – №2. – С. 79–84.
6. Козлов О. В. Тестування в освіті: теорія і практика. – К.: Освіта, 2016. – С. 108-113.
7. Why you should use EasyTestMaker! [Електронний ресурс] Режим доступу: EasyTestMaker
8. Google Forms about page [Електронний ресурс] Режим доступу: https://www.google.com/intl/uk_ua/forms/about/
9. About Quizlet [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://quizlet.com/mission>

Received (Надійшла) 06.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.04.2024

Promotion of AI in TestHUB

B. Popovich, G. Zavolodko

Abstract. The article analyzes an innovative approach to online testing through the integration of piece intelligence into TestHUB, a platform that automates the creation of tests. As a result of the experiment, it was concluded that storage cells can now quickly generate food that meets the previous initial criteria, thereby increasing the effectiveness of the initial process. The service allows you to adapt tests to the individual needs of students, simplifies preparation and expands the possibilities for a creative approach before starting. This examines in detail TestHUB's warehouse systems, modules and algorithms, and also presents the results of testing the functionality of the platform. The importance of the integration of society into the lighting process is reinforced, echoing the increased focus on the beginning and changing emphasis on storage.

Keywords: online testing, piece intelligence, knowledge assessment, modern technologies, personalized tests, HI algorithms, system modules, functionality analysis.

I. Radchenko, O. Shekhovtsov, A. Kovalenko, O. Sytnyk

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

FORMATION OF CLUSTERS ON SINGLE-BOARD COMPUTERS IN IOT NETWORKS

Abstract. The article looks at the problem of using single-board computers for Internet technology. An analysis of current single-board computers in various countries was carried out. Single-board computers and clusters of single-board computers have found their place in the concept of edge computing, allowing optimization of hard computing by placing computing resources closer to the core. The idea of a “virtual cluster” lies in the unification and organization of disparate heterogeneous devices for the development of various complex computing tasks from the available resources of the existing infrastructure of edge computing, what is known in the area. First of all, we have secured the resources of single-board computers. Such a cluster will also allow the use of resources from the existing infrastructure in a more efficient way, for example, by activating additional services from processing and saving data.

Keywords: single-board computer, cluster, Internet of Things, edge computing.

Introduction

Currently, all over the world, Internet of Things technologies (IoT , Internet of Things) are increasingly becoming an integral part of our daily life, for example: smart home, smart city, agriculture, medicine, logistics, etc. The huge amount of data generated by Internet of Things devices requires further post-processing and analysis, including the use of machine learning. To process incoming information, “clouds” are used, where data center facilities directly analyze them and make decisions based on the results obtained. However, the number of devices connected to the Internet is constantly increasing, which leads to difficulties in processing data in the “clouds” due to an increase in incoming data, increased load on the network, increased delays in data transfer between nodes, etc.

One solution to this issue is the development of edge computing technologies, which allow us to take on part of the load and reduce the response time to an event. To organize edge computing, single-board computers are used, which have compact sizes and high energy efficiency, but low performance, which does not allow solving computationally complex problems using the resources of a single device. One solution to this problem is to create a local cluster consisting of computers with limited computing resources.

Analysis of current single board computers in various fields

Single board computer is a self-contained computer assembled on a single printed circuit board on which all the necessary components are installed to ensure its functioning: processor, RAM, input-output systems, etc.

The first truly single-board computer appeared back in 1976 and was called “MMD-1” (Mini-Micro Designer 1), but at the same time this format of computer execution became truly widespread and accessible only in 2012 with the advent of Raspberry Pi [1]. This computer is primarily aimed at the educational sphere and training in computer use, programming, etc. With a low price and sufficient performance to run a full-fledged Linux-based operating system, it has gained popularity among many enthusiasts and researchers from various fields. Thanks to the success of Raspberry Pi and other manufacturers began to offer their models of single-board computers and currently there are more than 200 models of single-board computers in the world. The most popular are various Raspberry models Pi 3 and 3b+ , RP Zero W and 2020 model Raspberry Pi 4, which has several variants with 2 GB, 4 GB and 8 GB of RAM. Among other manufacturers, it is worth noting Banana Pi M5, RockPro64, Odroid N2. Comparative characteristics of single-board computers are presented in Table 1.

Table 1 – Comparison of characteristics of single-board computers

| | RAM (GB) | SoC | GPU | Ethernet | Storage |
|------------------|----------------|---|--------------|--|-----------------------|
| Raspberry Pi 3b+ | 1 LPDDR2 | ARM Cortex A53 | VideoCore IV | 330 Mbit Ethernet, 2.4GHz and 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 4.2, BLE | microSD cards |
| Raspberry Pi 4 | 2, 4, 8 LPDDR4 | 4 x Cortex-A72 | VideoCore VI | 1000 Mbit/s Ethernet 802.11b/g/b/ac WiFi 5 and Bluetooth 5.0 | microSD cards |
| RP Zero W | 0.5 | 1 x ARM1176JZFS | VideoCore IV | 802.11 b/g/n wireless LAN, BLE 4.1 | microSD cards |
| RockPro64 | 4 LPDDR 4 | 4 x ARM CortexA53 2x ARM Cortex A72 | MaliT860-MP4 | 1000 Mbit/s Ethernet | slot for eMMC module |
| Banana Pi M5 | 4 GB LPDDR4 | Quad-Core Cortex-A55 | Mali-G31 GPU | 1000 Mbit/s Ethernet | microSD – card + eMMC |
| Odroid N2 | 2, 4 | Quad-core Cortex-A 73 Dual -core Cortex-A53 | Mali-G52 GPU | 1000 Mbit/s Ethernet Optional WiFi USB adapters | microSD – card +eMMC |

Many manufacturers of single-board computers have taken the path of producing modular boards in the SO-DIMM connection format; an example is the Raspberry Pi3+ computing module, the distinctive feature of which is data storage in the form of an eMMC drive with 32GB of permanent memory, in contrast to the younger model with a micro -SD card . This solution is primarily designed for the industrial sector.

At the end of 2022 and the beginning of 2023, boards in a new form factor of a modular solution began to appear; an example of such a board is the Raspberry single-board computer Pi Compute Module 4, like the previous model, this module has only a connection module to the main board, which was replaced from the SO-DIMM version in favor of 100-pin Hirose DF40C-100DS-0.4V mezzanine connectors, which made it possible to increase the data exchange speed between the boards and reduce the size the board itself.

Boards of this format are primarily intended for developers and the industrial sector; they have found their application in the field of the Internet of Things in the field of edge computing, and the board is also suitable for creating IoT projects of varying complexity.

Existing solutions for cluster formation

Single-board computers are classified as devices with limited computing resources, since their performance and physical resources of the device do not allow solving computationally complex problems and to solve this problem they are combined into clusters. Until

recently, cluster computing was too expensive and complex for ordinary users, but the popularity of single-board computers has led to the emergence of low-cost clusters based on these devices.

Also, single-board computers and clusters of single-board computers have found their application in the concept of edge computing, allowing for the optimization of cloud computing by placing computing resources as close as possible to the source (network boundary), which also increases the efficiency of processing information from end devices [3]. The next step in the development of this concept is considered to be the implementation of “ultra-boundary computing” (Extreme edge), an example would be “ smart” technology dust " (“smart dust”) built on the use of wireless self-organizing devices for the purpose of processing and transmitting data in the system.

It is worth noting that since 2016, research has been underway to develop various methods and tools for organizing calculations and distributed data storage on single-board computers in edge computing, but at the moment there are no ready-made solutions in this area. But attempts to organize distributed computing on “available” computing systems have been made before.

Since 2012, single-board computers began to be widely used in research activities, as well as in developing their own projects and conducting experiments. As noted earlier, since 2016, special attention has been paid to research into the use of single-board computers in edge computing. Let's look at some cluster projects and their application in various fields.

Table 2 - Overview of the application area of single board computers

| Application area | Devices used | Performed tasks |
|----------------------------|---|---|
| For educational purposes | Raspberry Pi | 1) performing computational tasks; 2) testing system performance in various frameworks, including Hadoop |
| | Raspberry Pi B b . | Cluster Computing Training |
| | Raspberry Pi | testing system performance in various tasks |
| | Raspberry Pi | Evaluation of the use of single board computers for cyber operations |
| | Raspberry Pi 2 | 1) performing computational tasks. 2) about learning cluster computing |
| | Raspberry Pi(link is external) 2 Model B | Performing Computational Tasks Modeling and Forecasting |
| | Raspberry Pi 3 b+ (1060 devices) | performing computational tasks; demonstration of capabilities; about learning cluster computing |
| | Raspberry Pi 3 b+ | Working with big data Performance Analysis of a Hadoop Distributed System |
| Edge computing computing) | Raspberry Pi | Cloud computing in the concept of edge computing |
| | Raspberry Pi | Using a cluster as a compute node for edge computing Benchmarking Container Services Performance |
| | Pi Stack | Managing remote Beowulf- based single board computers |
| | Raspberry Pi Odroid XU4 Lattepan4 4G | Distributed Stream Data Processing End Device Management |
| | Raspberry Pi | Research on Cloud Computing on Single Board Computers Stream processing |
| | RockPro64 | distributed deep neural network on a cluster of single-board computers |
| | Raspberry Pi | Architecture for clustered container applications edge computing |

The works presented in Table 2 show only some of the developments being carried out in the direction of

research and application of single-board computers; their importance in the future can hardly be overestimated.

Despite their modest performance, single-board computers have already found their way into many areas of industry, with particular response in the area of the Internet of Things and edge computing. However, all developments and attempts to implement high-performance computing on such a cluster are experimental in nature and there is no ready-made solution at the moment.

Application of clusters on single-board computers in Internet of Things networks

Clusters of single-board computers have proven their effectiveness not only in the field of education and training in working with cluster systems, but also their high efficiency of use in industry for controlling various systems, they have also found their application in robotics, in “smart systems”, for example: parking lots, smart houses, street lighting. Cluster systems based on single-board computers are used to support web services and various servers, since such a system is able to effectively scale and connect additional nodes as the load on the system grows, thus ensuring energy efficiency of the complex as a whole. Moreover, if one of the nodes fails, the fault tolerance of the system is guaranteed, and the low cost of a single-board computer compared to a conventional system reduces maintenance costs. The number of single-board computers involved is constantly growing and in the future this growth will only increase, while the available resources of single-board computers or classic cluster systems are not always fully used or are completely idle.

The idea of a “virtual cluster” is to combine and organize disparate heterogeneous devices to solve various complex computing problems using free (available) resources of the existing infrastructure located in the field of edge computing. First of all, designed to use the resources of single-board computers. Such a cluster will also make it possible to use the resources of the existing infrastructure more efficiently, for example, by deploying additional services for data processing and storage.

Conclusions

1. The article discussed single-board computers and their application in the field of the Internet of Things. A review of current single-board computers and their use in the development of clusters involved in the educational sector, as well as in edge computing, was carried out, including a possible approach to creating compact cluster modular systems on a single backplane.

2. In this work, single-board computers refer to computers with limited computing resources due to hardware limitations imposed on them by the manufacturer, the lack of ability to expand quality characteristics (RAM, central processor, etc.), including the overall computing performance is not allowing you to solve computationally complex problems on par with standard computers. However, when several devices are combined into a cluster, it becomes possible to use their resources to solve distributed tasks.

REFERENCES

1. 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>
2. Fatlawi, A., Al Dujaili, M.J. (2023). Integrating the Internet of Things (IoT) and Cloud Computing Challenges and Solutions: A Review. *AIP Conference Proceedings*, 2977(1), 020067. doi: <http://dx.doi.org/10.1063/5.0181842>
3. 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>
4. 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>
5. 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>
6. Kuchuk, N., Mozhaiev, O., Semenov, S., Haichenko, A., Kuchuk, H., Tiulieniev, S., Mozhaiev, M., Davydov, V., Brusakova, O., Gnusov, Y. (2023). Devising a method for balancing the load on a territorially distributed foggy environment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(4 (121)), 48–55. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.274177>
7. Kuchuk, N., Kovalenko, A., Ruban, I., Shyshatskyi, A., Zakovorotnyi, O., Sheviakov, I. (2023). Traffic Modeling for the Industrial Internet of NanoThings. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology*, KhPI Week 2023 - Conference Proceedings, 2023, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312856>
8. Sharma, Sh. Saini H. (2019). A novel four-tier architecture for delay aware scheduling and load balancing in fog environment. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2019.100355>

Received (Надійшла) 27.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.04.2024

Формування кластерів на одноплатних комп'ютерах у мережах IoT

І. В. Радченко, О. В. Шеховцов, А. А. Коваленко, О. В. Ситник

Анотація. У статті розглянуто проблему використання одноплатних комп'ютерів для технології Інтернету речей. Проведено аналіз сучасних одноплатних комп'ютерів у різних галузях. Одноплатні комп'ютери та кластери з одноплатних комп'ютерів знайшли своє застосування в концепції граничних обчислень, дозволяючи реалізувати оптимізацію хмарних обчислень шляхом розміщення обчислювальних ресурсів якомога ближче до джерела. Ідея «віртуального кластера» полягає в об'єднанні та організації розрізнених гетерогенних пристроїв для вирішення різних складних обчислювальних завдань з використанням вільних (доступних) ресурсів вже існуючої інфраструктури граничних обчислень, що знаходяться в межах досяжності насамперед розрахованої області знаходження датчиків IoT. Такий кластер також дозволить використовувати ресурси існуючої інфраструктури раціональніше, наприклад, розгорнувши додаткові сервіси з обробки та зберігання даних у шарі граничних вузлів.

Ключові слова: одноплатний комп'ютер, кластер, Інтернет речей, граничні обчислення.

O. Skakalina, A. Kapiton

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

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE APPLICATION OF HEURISTIC ALGORITHMS FOR SOLVING THE TSP PROBLEM

Abstract. The need to solve the traveling salesman problem (TSP) often arises when solving practically significant optimization problems, such as problems in the field of economics, logistics in the widest range of applications, in chains of technical programs. Quite often, the specifics of these problems require obtaining a solution that is as close to the exact value as possible. But the TSP problem is NP-complex, that is, its exact solution can be obtained only in exponential time. Therefore, it is not efficient to solve the TSP problem by the full search algorithm in the presence of a large number of vertices of the graph. However, there are various heuristic algorithms that allow finding a rational solution to this problem with a large number of vertices in a time acceptable for the relevant subject area. In this work, the problem of the traveling salesman is defined as a mathematical programming task of finding the shortest path for the movement of a traveling salesman (traveling salesman), the goal of which is to visit all the objects involved in the task in the shortest time and with minimal costs. Appropriate adaptations of the heuristic algorithms, namely the genetic algorithm and the ant colony algorithm, were developed in the MATLAB environment. A computational experiment was performed on the same input sample, a comparative analysis of the performance of two heuristic algorithms, and the effectiveness of the use of heuristic algorithms for solving NP-complex problems was proven.

Keywords: genetic algorithms, NP-complex problem, TSP-problem, ant colony algorithm, MATLAB.

Introduction

At the current stage, many effective algorithms have been developed for solving the traveling salesman problem (TSP). However, the problem remains NP-complete, which means that its solution in the general case takes time, which grows exponentially with the number of cities. Therefore, genetic algorithms are usually used to solve the problem for large data sets.

The importance of the decision of the Central Committee can be highlighted in the following areas:

- *Transport:* TSP is widely used in transport logistics to optimize freight transport routes. This allows you to reduce transportation costs, increase the efficiency of the use of vehicles and reduce the negative impact on the environment.

- *Sales:* TSP is used to optimize product distribution routes. This allows companies to reduce shipping costs, improve customer service and increase sales.

- *Production:* TSP is used to optimize routes for the delivery of raw materials and finished products at enterprises. This allows companies to reduce production costs, improve resource efficiency and reduce production waste.

In addition, TSP is used in other areas, such as:

- *Information technologies:* TSP is used to optimize data delivery routes in computer networks.

- *Service:* TSP is used to optimize customer service routes.

- *Entertainment:* TSP is used in some games such as chess and go.

- *Computer science:* TSP is used for testing optimization algorithms. It is a good example of a complex problem for which there are many effective algorithms.

- *Other spheres of activity:* TSP is also widely used in other spheres of activity. For example, it can be used to optimize customer service routes, travel routes, flight schedules, etc.

The development of technologies and the globalization of the economy make the solution of TSP even more urgent. For example, the growth of trade volumes between countries requires the search for the most efficient routes for the delivery of goods. And the development of unmanned aerial vehicles opens up new opportunities for the application of TSP in logistics. The solution to this problem is of particular importance in the current state of the country. Because calculations of optimal flight routes of military UAVs are of decisive importance.

The solution of TSP is a complex mathematical problem. However, thanks to the development of computer technologies, effective algorithms have been developed that allow finding practically optimal solutions for problems with a large number of cities.

1. Analysis of recent research and publications

The traveling salesman problem is defined as a mathematical programming task of finding the shortest path for a traveling salesman (traveling salesman), the goal of which is to visit all the objects involved in the problem in the shortest time and with minimal costs. In graph theory, it is finding a route that connects two or more nodes, using the appropriate criterion of optimality. The task of the wandering merchant is to find the most optimal path that passes through the marked cities at least once. In the conditions of the problem, the indicator of the profitability of the route (the cheapest, the shortest, the least time-consuming, etc.) and the corresponding matrices of costs, distances, etc. are indicated. As a rule, it is indicated that the path should include each city of the route only once, under this condition the choice is made between the so-called Hamiltonian cycles. The traveling salesman problem (TSP) is an NP-complex discrete optimization problem. There are no fast polynomial algorithms for its solution. In terms of graph theory, this problem is defined as

follows: the shortest path should be found that passes through the defined nodes of the graph at least once with a subsequent return to the node at the beginning of the route [1].

The Traveling Salesman Problem (TSP) is a combinatorial optimization problem that consists in finding the shortest route that passes through all cities at least once. Formally, the task of a traveling salesman can be formulated as follows:

Given:

set of cities $V=\{1,2,\dots,n\}$;
distances between cities d_{ij} , where $i,j \in V$.

Find:

a route R passing through all cities V and having a minimum length of:
 $i=1 \sum_{n-1} d_{i,i+1} + d_{n,1} = R \in \text{Rmin}(i,j) \in R \sum d_{ij}$
where R is the set of all routes passing through all cities of V .

For the first time, the TSP problem was formulated in 1930 and today it is one of the most studied optimization problems in information and communication technologies [2-8]. Despite the fact that the problem is computationally complex (belongs to the class of NP-complex), many heuristic and exact algorithms are known, which were used to solve practical problems.

Research on solving the traveling salesman problem can be conditionally divided into two directions [2-8].

1. Development of accurate algorithms that work fast enough only for small-sized problems;

2. Development of "non-optimal" or heuristic algorithms that provide approximate solutions in reasonable time.

One can also highlight the search for special cases of the TSP problem ("sub-problems") for which either better or exact heuristics are possible.

It is also important to distinguish between symmetric and asymmetric TSP tasks. For the symmetric case (usually called simply TSP), for all distances in D the equality $d_{ij} = d_{ji}$ holds, that is, it does not matter whether we move from i to j or vice versa, the distance is the same. In the asymmetric case (called ATSP), the distances are not equal for all pairs of cities. Problems of this kind arise when we are not dealing with spatial distances between cities, but, for example, with the cost or time required to travel between places, where the price of a plane ticket between two cities may be different. In this case, we will consider a symmetric version of the TSP problem.

It is quite obvious that the task can be solved by going through all the travel options of the traveling salesman and choosing the optimal one. The thing is that the number of possible routes N grows very quickly with the number of cities to visit n $N=n!$.

For example, for $n = 100$, the number of options will be represented by a 158-digit number. A modern computer capable of processing a million operations per second will struggle with the task for about 144 years.

It is considered proven that there is no exact TSP solution algorithm that has polynomial complexity (that is, has an asymptotic estimate of the algorithm execution time $T(n) = O(n^\alpha)$) of the complexity of

execution. Therefore, the TSP problem for any large n becomes almost unsolvable for exact algorithms.

TSP is a problem that is hard for NP and is so easy to describe and so hard to solve. In this case, you should give up trying to find an exact solution to the traveling salesman's problem and focus on finding an approximation - even if not optimal, but at least close to it. Due to the great practical importance of the task, approximate solutions will also be useful [2-8].

The Evolutionary Algorithm (EA) is an algorithm first proposed by Charles Darwin in 1859. It provides solutions for various optimization problems. It copies the process of evolution that occurs in nature, i.e. mutation, recombination and natural selection. GA (Genetic Algorithm) is a type of evolutionary algorithm. GA provides a solution to a problem in the form of strings of numbers and applies operators such as mutation and recombination. It starts from the seed and finds the most appropriate generation of the population using these operators.

The ACO (Ant Colony Optimization) algorithm is also a heuristic algorithm first discovered by Marco Dorigo that provides an optimal solution by simulating the way ants find food. ACO is a type of AI (swarm intelligence) technique.

The PSO (Particle Swarm) algorithm, first discovered by Kennedy and Eberhart, also provides an optimal solution to the problem and is inspired by flocks of birds, fish, and herds of animals. This mimics how they find their food environment and follows an information sharing approach.

In addition to presenting TSP as a combinatorial optimization problem, TSP can also be formulated as a theoretical problem of graph theory.

Let us present TSP in the formulation of the graph theory problem. Graph theory defines the problem as finding the Hamiltonian cycle with the least weight for a given complete weighted graph. This kind of problem formulation is widespread in engineering applications and some industrial problems such as machine planning, cellular manufacturing and frequency assignment problems can be formulated as TSP.

Let a weighted graph $G = (V, E)$ be given, in which cities correspond to the set of vertices $V = \{1, 2, \dots, n\}$ and each edge $e_i \in E$ has a corresponding weight w_i representing the distance between the cities it connects. If the graph is not complete, missing edges can be replaced by edges with very long distances.

The goal of solving the TSP problem is to find a Hamiltonian cycle, that is, a cycle that visits each node on the graph exactly once, with the smallest possible weight for the given graph. This formulation naturally leads to procedures involving the search for minimal tree frames for a given graph.

TSPs can also be represented as integer and linear programming programs. The formulation of integer programming (IP) is based on the assignment problem with the additional constraint of no subtours [9].

The branch-and-bound method is a discrete optimization algorithm used to find the optimal solution to a problem in which only discrete variable values are possible. The method works by building a decision tree,

in which each node represents a possible solution to the problem. The branch-and-bound method starts with the root node of the tree, which represents the initial solution to the problem. Then, the algorithm uses a cut-off criterion to discard nodes that cannot contain an optimal solution. The cutoff criterion is a function that estimates the probability that a node contains an optimal solution [10].

If the node is not discarded, then the algorithm branches it into two new nodes, which represent two possible options for continuing the solution of the problem. Then, the algorithm repeats this process for each of the new nodes.

The branching process continues until an optimal solution to the problem is found or until the entire decision tree is explored.

The branch-and-bound method is an effective algorithm for solving many discrete optimization problems. However, it may not be effective for problems with very large decision trees [10]. Here is an example of how the branch-and-bound method can be used to solve the traveling salesman problem. The task of the traveling salesman is to find the shortest route that passes through all the cities visited by the traveling salesman.

To solve this problem, we can build a decision tree in which each node represents a possible route of the traveling salesman. Then, we can use a cut-off criterion to discard nodes that cannot contain an optimal route.

One of the cutoff criteria that can be used for the traveling salesman problem is the following. If the length of the route from a node to its parent node is greater than or equal to the length of the shortest known route, then the node can be discarded.

This cutoff criterion works because if the length of the route from a node to its parent node is greater than or equal to the length of the shortest known route, then that node cannot be a continuation of the shortest known route. By using this cutoff criterion, we can limit the size of the decision tree to be examined. This can significantly improve the efficiency of the algorithm.

The branch-and-bound method is used to solve many discrete optimization problems, including:

- Task of a traveling salesman;
- Maximum flow problem;
- Placement problem;
- Timetable problem;
- Backpack problem;
- Assignment task.

The branch-and-bound method is a powerful tool for solving discrete optimization problems. It can be used to solve a wide range of problems, including problems with very complex constraints [10]. Dijkstra's algorithm is a widely used algorithm for finding the shortest path in a weighted graph from one vertex to all others. It was developed by Edsger Dijkstra in 1959 and is characterized by its simplicity and efficiency.

Working principle:

1. Input data:

A weighted graph $G = (V, E)$, where V is the set of vertices and E is the set of edges, each edge is assigned a weight (price).

The initial vertex s from which to find the shortest paths.

2. Initialization:

For each vertex v in G , we store two values:

$\text{dist}[v]$: Estimated distance from initial vertex s to v (initially infinite except $\text{dist}[s] = 0$).

$\text{prev}[v]$: predecessor of v on the shortest path (None initially).

3. The main cycle:

- We select an unvisited vertex v with the minimum $\text{dist}[v]$ score.

- Mark v as visited.

- For each unvisited neighbor w of vertices v :

- $\text{new_dist} = \text{dist}[v] + \text{weight}(v, w)$: we calculate the estimated distance to w through v .

- If $\text{new_dist} < \text{dist}[w]$: update the estimated distance $\text{dist}[w]$ and the predecessor $\text{prev}[w]$ to v .

4. Output:

$\text{dist}[v]$ contains the distance from the starting vertex s to each vertex v .

$\text{prev}[v]$ allows you to recover the shortest path from s to v , moving along the predecessors.

Advantages:

- Ease of implementation.

- Guaranteed to find the shortest path.

- Effective for graphs with non-negative weights.

- Disadvantages:

- Inefficient for graphs with large negative weights.

- Cannot find all shortest paths if the graph has cycles with negative weights.

- Algorithms of combinatorial optimization are classified by such an indicator as the accuracy of obtaining a solution.

2. Statement of the research problem

Genetic algorithms are a family of computational models inspired by evolution. These algorithms work on the principle of encoding a potential solution to a specific problem based on a simple chromosomal data structure, by recombining these structures while preserving critical information. Genetic algorithms are often considered as an optimizer of functions, although the range of problems of their application is much wider. The implementation of the genetic algorithm begins with the formation of a population of (usually random) chromosomes. Then these structures are evaluated and their reproductive capabilities are identified, that is, those chromosomes that are the best solution to the target problem. Thus, from generation to generation, useful traits spread throughout the population, and bad ones gradually disappear. Thanks to the crossing of the most adapted individuals, more promising areas of the search space are inherited. Eventually, the population will converge to the optimal solution to the problem. GA finds approximate optimal solutions in a fairly short time, which is an obvious advantage of this method. Thus, the genetic algorithm is a heuristic search algorithm that is used to solve optimization and modeling problems by randomly selecting, combining, and varying the parameters sought using mechanisms that resemble biological evolution.

"Genetic" algorithms began to be called later, until in 1975 Holland called them reproductive plans and considered them primarily as adaptation algorithms. But the shift in emphasis in the interpretation of the concept of "adaptation", which the author talks about in the preface of 1992, very accurately conveys the state of ambiguity, trying, on the one hand, to give a fairly general and uncontroversial concept of adaptation, and on the other hand, to distinguish between the concepts of adaptation and optimization, adaptation and evolution, adaptation and learning.

Genetic algorithms are search algorithms that are based on the concepts of natural selection. In nature, individuals with better survival traits exist for a longer period of time, as they have a better chance of producing offspring with similar genetic material. Over time, the entire population will consist of a large number of genes from superior individuals and a smaller number from weaker ones. The mistake of older theorists, such as Jean-Baptiste Lamarck, was that the environment influenced the individual personality. That is, the environment will force the individual to adapt to it. The molecular explanation of evolution proves that this is biologically impossible. The species does not adapt to the environment, rather, only the strongest survive. This is how natural selection works in genetic algorithms. The genetic algorithm differs from other search methods in that it searches among a set of points and works with a set of parameters, rather than the parameter values themselves. It also uses objective function information without any gradient information. Whereas traditional methods use gradient information. Because of these features of the algorithm, they are applied to various optimization functions, parameter estimation, and machine learning programs [11].

At this stage of development, there is no specific strategy for building a solution, there is a huge number of individual implemented algorithms that are not very similar to each other. However, the operation of all these algorithms can be presented in the form of a traditional scheme of operation of these algorithms (Fig. 1). There can be several criteria for stopping the search for a solution: time frames, the number of created populations, and a decrease in the improvement of the fitness function compared to previous iterations.

The potential of genetic algorithms is difficult to overestimate. When it is almost impossible to find a solution by conventional methods, they are the obvious way out of the situation. In various forms, genetic algorithms are applied to scientific and technical problems. They can be used in building computational frameworks such as state machines and sorting networks. They are often used in the design of neural networks and robot management, in modeling the development of processes in various subject areas, in game strategies, scheduling, logistics, cutting tasks, in the development of artificial life, and in many other areas [12]. However, the most popular application of genetic algorithms is the optimization of multiparameter functions.

So, for example, experiments are being conducted to create robots working in a team for the purpose of demining the territory. It is based on a multilayer neural

network, which is directly responsible for controlling the robots and, in addition, transmits and receives signals to other team members. In other words, in addition to parametric optimization, the hybrid neuromodel performs an implicit creation of a communication language between robots. All parameters of the neural network are optimized using genetic algorithms. The results of such hybridization of various methods and algorithms of artificial intelligence show a clear advantage of a team of sapper robots that exchange information with each other over robots that operate without any communication. As a result, this technology can save many human lives in the long run, and hopefully the sapper's profession will not be so relevant.

In recent years, the scientific direction of Natural Computing has been intensively developed, which combines mathematical methods that incorporate the principles of natural decision-making mechanisms. These mechanisms ensure the efficient adaptation of flora and fauna to the environment for millions of years.

One of these methods is ant algorithms, which are based on the principles of self-organization of an ant colony. Despite the disjointed behavior of each of its representatives, it forms a highly organized system consisting of a large number of "agents" - ants, and thanks to this, it is able to solve complex tasks that exceed the capabilities of each individual element.

Studying the behavior of an ant colony is interesting for computer science because it provides insight into the disjoint organization, which is very useful for solving complex optimization problems.

The idea behind the ant algorithm is to model the behavior of ants related to their ability to find the shortest path from the anthill to the food source and adapt to changing conditions by finding a new shortest path. When moving, an ant marks its path with a pheromone, and this information is used by other ants. This is the basic rule of conduct for each representative of the colony in case the old route becomes unavailable. If an ant encounters an obstacle while moving, it will go around it to the left or right with equal probability. The same will happen on the way back. However, those ants that choose the shortest path will go through it faster and in a few moves it will be stronger. If we model the process of such behavior on a graph, the edges of which are all kinds of movement paths, then for some time the path most enriched with pheromone will be the shortest, which will solve the problem [13].

3. Basic material and results

The first version of the ant algorithm was proposed by Marco Dorigo in 1992. This scientist, in fact, proposed a mathematical model of the behavior of ants looking for paths from a colony to a food source and is metaheuristic optimization.

An ant colony is considered as a multi-agent system in which each agent (ant) functions autonomously according to very simple rules. In contrast to the almost primitive behavior of agents, the behavior of the entire system turns out to be surprisingly reasonable [14].

The basis of the "social" behavior of ants is self-organization - a set of dynamic mechanisms that ensure the achievement of a global goal by the system as a result of low-level interaction of its elements. A fundamental feature of such interaction is the use of only local information by system elements. Self-organization is the result of the interaction of the following five components:

- a. randomness;
- b. multiplicity;
- c. positive feedback;
- d. negative feedback;
- e. objective function.

These components are the key properties of the ant algorithm. Let us consider them in more detail using the example of the movement of ants for food from an anthill (Fig. 1) [14].

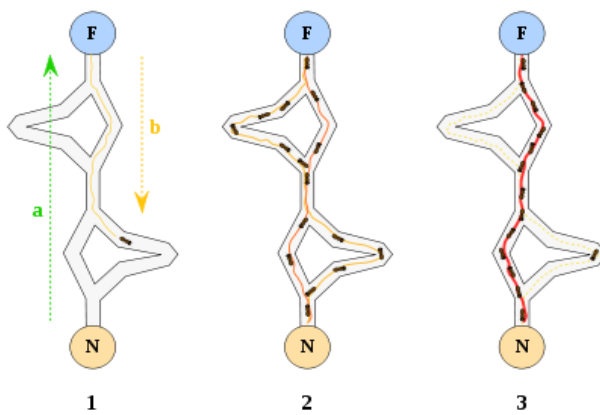


Fig. 1. Movement of ants for food

When an ant moves from an anthill (point F) to food (point N), pheromone is deposited throughout the entire path (obviously, the shortest path is marked by the green arrow – (a)). At the same time, the greater the density of the pheromone, the shorter the path, accordingly, the ant will leave less pheromone on a long section of the path. The longer the path, the faster the pheromone evaporates. Over time (if an approximately equal number of ants move along all sections), the ants will leave the most pheromone on the shortest section of the path. Thus, most ants will choose the shortest path - that is, they will leave even more pheromone on it, which will reduce the probability of moving along other routes (although this probability will remain, as you can see, one ant still moves along a different part of the path).

Accident. From the above example, it is possible to reveal the random nature of the movement of ants. Indeed, at the first stage, ants focus on all kinds of options for constructing their path. Even when the density of the pheromone helps to choose the optimal (shortest) route, there remain "distrustful individuals" who do not stop trying to find more optimal routes.

Multiple use. Of course, with one ant or even dozens of individuals, it is unlikely to be able to choose the optimal path. It takes many, many attempts to find the shortest path or at least warn others not to go in that direction. A pheromone and positive feedback serve as

such a warning [14].

Positive feedback. Zoologists call it stigmergy. Stigmerges are a time-dispersed type of interaction, when one subject of interaction changes some part of the environment, and others use information about its state later, when they are in its vicinity. Thus, positive feedback is a kind of "collective memory" based on pheromone. Using this "memory" (based on trial and error) you can find the right solution.

Negative feedback. Eventually, the pheromone evaporates, which allows the ants to adapt their behavior to changes in the external environment. The distribution of pheromone in the space of movement of ants is a kind of dynamic variable of the global memory of the anthill. Any ant at a fixed moment in time can perceive and change only one local cell of this global memory [15].

Objective function. The most important element of the algorithm is the objective or fitness function to be optimized (for an ant, this is the shortest route). But you can successfully solve other similar tasks. Do not forget that the ultimate goal of the algorithm is optimization (in the language of mathematics, it means finding a global or acceptable maximum or minimum). The algorithm is heuristic, that is, it does not guarantee an exact solution, but only an approximate or acceptable one.

Condition of the problem. It is necessary to find the shortest route that starts in the starting city and ends in it. The route must pass through all cities only once.

The ant algorithm will be implemented to find the shortest route around all regional centers of Ukraine, i.e. 25 cities, the beginning of the route is in the city of Vinnytsia.

The developed algorithm will work with city coordinates and calculate results in degrees. The ant algorithm was programmed in the MATLAB system [16]. For the task with 25 regional centers of Ukraine, the algorithm without elite ants after 300 iterations found the optimal route with a length of 5216.18 kilometers in 14.16 seconds only in one case out of five. The solution can be improved by simply increasing the number of iterations to 1-2 thousand. The graph of the optimization of the objective function for each iteration is shown in Fig. 2.

The conducted experiments show that the population of solutions never degenerates to one common route for all ants. On the contrary, the algorithm continues to synthesize new, possibly better solutions. So, in any city for an ant there are several promising alternatives for continuing the route. Information with the results is given in Table 1.

Table 1 – Performance results of the ant algorithm with different iterations

| Iterations | Path in degrees | Distance in km | Algorithm operation time |
|------------|-----------------|----------------|--------------------------|
| 100 | 50.85 | 5660.68 | 6.36 s. |
| 200 | 49.51 | 5511.37 | 9.18 s. |
| 300 | 46.86 | 5216.18 | 14.16 s. |

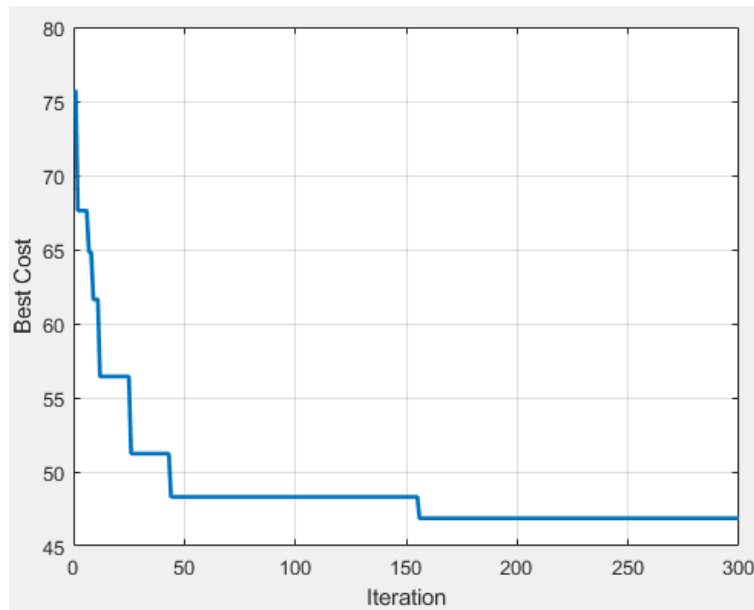


Fig. 2. Optimal current solutions of the ant algorithm

The condition of the problem for the operation of the genetic algorithm remains exactly the same as for the ant colony algorithm. It is necessary to find the shortest route that starts in the starting city and ends in it. The route must pass through all cities only once. It is necessary to go around 25 regional centers of Ukraine.

The selection process is carried out by creating chromosomes that have a low target function, a high probability of being selected, or a high probability value. The selection process used in this algorithm is roulette wheel selection.

After the selection process, the next process is the crossover process. The chromosomes used as parents are chosen randomly, and the number of chromosomes that undergo crossover is affected by the crossover rate parameter.

The mutation process used in this algorithm is reverse mutation. This mutation process is carried out by breaking the chromosomes at two points of intersection, and the subchromosomes recombine in the reverse order.

The number of chromosomes that undergo mutations in the population is determined by the mutation rate parameter.

The structure of chromosomes. Genes are part of a chromosome, where one chromosome consists of several interconnected genes. Chromosomes represent individuals, in other words, chromosomes are the same as individuals.

In the traveling salesman problem, the chromosomes formed contain genes that represent the serial numbers of all existing cities. The number of genes in each chromosome is equal to the number of cities. Each city serial number can appear in a chromosome only once.

The initial initialization of the population is carried out to obtain the initial solution of the genetic algorithm problem. This initialization is performed randomly for as many chromosomes/populations as desired. For example: each of the 25 cities has its own

coordinates, you need to make a path from them, each city can be used once. So, the initial population with 3 chromosomes and 25 genes can look like this:

```
Chromosome[1]=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25];
Chromosome[2]=[23 8 11 20 14 22 12 19 7 1 24
10 2 18 9 17 4 6 21 3 5 25 15 13 16];
Chromosome[3]=[21 8 25 12 10 6 20 17 24 9
19 23 11 5 14 3 2 22 7 16 18 13 4 1 15].
```

So, the above chromosomes represent several possible ways of traveling through cities by a traveling salesman. This path is the structure of chromosomes.

The implemented genetic algorithm for the task with 25 regional centers of Ukraine after 300 iterations found the optimal route with a length of 5146.57 kilometers in 2.44 seconds only in one case out of five. In this case, the solution did not improve after 300 iterations, so there is no point in putting more. The graph of the optimization of the objective function for each iteration is shown in Fig. 3. The conducted experiments show that the solution is at most 300 iterations away and usually it is the same. The algorithm does not continue to synthesize new, possibly better solutions, provided that they exist at all. Full information with results is given in Table 2.

Table 2 – Genetic algorithm results with different iterations

| Iterations | Path in degrees | Distance in km | Algorithm operation time |
|------------|-----------------|----------------|--------------------------|
| 100 | 46.9 | 5220.35 | 1.7 c. |
| 200 | 46.24 | 5146.57 | 2.14 c. |
| 300 | 46.24 | 5146.57 | 2.44 c. |

Fig. 4 shows the path found in 300 iterations, although the path found in 200 iterations is also a quasi-optimal solution. So, according to the route of the best results, we have the following sequence (chromosome) of visits to distribution sites (Table 3).

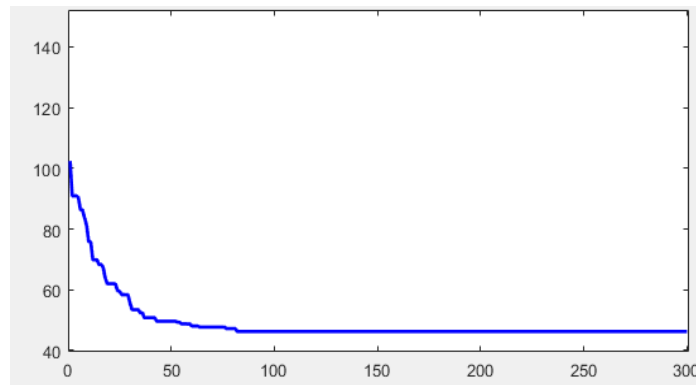


Fig. 3. Best current genetic algorithm solutions



Fig. 4. The optimal path according to the genetic algorithm

Table 3 – The best of the traveling salesman's routes found

| № | From which city to depart | Which city to go to |
|----|---------------------------|---------------------|
| 1 | Vinnitsa | Odesa |
| 2 | Odesa | Mykolaiv |
| 3 | Mykolaiv | Kherson |
| 4 | Kherson | Simferopol |
| 5 | Simferopol | Zaporizhzhia |
| 6 | Zaporizhzhia | Dnipro |
| 7 | Dnipro | Donetsk |
| 8 | Donetsk | Luhansk |
| 9 | Luhansk | Kharkiv |
| 10 | Kharkiv | Sumy |
| 11 | Sumy | Poltava |
| 12 | Poltava | Kropyvnytskyi |
| 13 | Kropyvnytskyi | Cherkasy |
| 14 | Cherkasy | Chernihiv |
| 15 | Chernihiv | Kyiv |
| 16 | Kyiv | Zhytomyr |
| 17 | Zhytomyr | Rivne |
| 18 | Rivne | Lutsk |
| 19 | Lutsk | Lviv |
| 20 | Lviv | Uzhhorod |
| 21 | Uzhhorod | Ivano-Frankivsk |
| 22 | Ivano-Frankivsk | Ternopil |
| 23 | Ternopil | Chernivtsi |
| 24 | Chernivtsi | Khmelnyskyi |
| 25 | Khmelnyskyi | Vinnitsa |

In order to draw a conclusion about the effectiveness of the ant colony algorithm and the genetic algorithm, it was decided to compare their work with each other to solve the same task of a traveling salesman to visit all regional centers of Ukraine.

A comparison of the number of iterations, the length of the best route, and the running time of the algorithm is shown in Table 4.

Table 4 – Comparison of the work of genetic and ant algorithms

| Number of iterations | Ant algorithm | | Genetic algorithm | |
|----------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| | Best route length (km) | Algorithm operation time | Best route length (km) | Algorithm operation time |
| 100 | 5660.68 | 6.36 c. | 5220.35 | 1.7 c. |
| 200 | 5511.37 | 9.18 c. | 5146.57 | 2.14 c. |
| 300 | 5216.18 | 14.16 c. | 5146.57 | 2.44 c. |

Conclusions

The results of the algorithms show that the ant algorithm takes more time to solve the problem. The ant algorithm can find solutions for 25 cities in 300 iterations.

This is due to the fact that the results of the ant colony algorithm converge longer to a certain value (minimum solution) compared to the genetic algorithm.

In this study, the genetic algorithm can provide a better solution because the genetic algorithm in each run presents a better average optimal solution. If the population is large, this will require many iterations. On average, each run of the genetic algorithm implementation process presents a better solution than the ant one, where in each run the solution graph of the

genetic algorithm salesman problem is relatively stable with low solution fluctuations compared to the ant colony algorithm.

Both algorithms can be classified as good and able to present an optimal solution to the traveling salesman problem, which is sufficient for most practical problems.

The simulation results for a 25-city path show the optimal travel route by choosing the best path without intersecting routes.

REFERENCES

1. The Traveling Salesman Problem: A Computational Study, D.L. Applegate, R.E. Bixby, V. Chvátal & W.J. Cook (2006). [Electronic resource]. URL: <https://www.math.uwaterloo.ca/tsp/book/contents.html> (Date accessed 11/01/2023).
2. Mathematical methods of operations research: a textbook/ E. A. Lavrov, L. P. Perhun, V. V. Shendryk and others. – Sumy: Sumy State University, 2017. – 212 p.
3. Hassan M. H. Mustafa, Ayoub Al-Hamadi, Mohamed Abdulrahman, Shahinaz Mahmoud, Mohammed O Sarhan On Comparative Analogy between Ant Colony Systems and Neural Networks Considering Behavioral Learning Performance// Journal of Computer Sciences and Applications. 2015, vol. 3 No. 3, 79-89.
4. Biological bases of ant colonies - [Electronic resource]. URL: <http://posibniki.com.ua/post-prikladni-sistemi-kolektivnogo-intelektu-swarm-intelli-gence> (Date of application 10/15/2023).
5. Rukundo, O., Cao, H. Advances on image interpolation based on ant colony algorithm. SpringerPlus 5, 403 (2016) - [Electronic resource]. URL: <https://springerplus.springeropen.com/articles/10.1186/s40064-016-2040-9>
6. Korte B., Vygen J. Combinatorial Optimization: Theory and Algorithms (Algorithms and Combinatorics) 6th ed., New York, 2018, 455 p.
7. Divya M. A Comparison of Ant Colony Optimization Algorithms Applied to Distribution Network Reconfiguration// International Journal of Engineering Research & Technology, Volume 3, Issue 01, 2016. – pp. 1-4.
8. Hahsler M., Hornik K. TSP – Infrastructure for the Traveling Salesperson Problem// Journal of Statistical Software, December 2007, Vol. 23, Issue 2, 2007. – pp. 1-21.
9. Genetic algorithms. Key concepts and implementation methods. znannya.org : website. URL: http://www.znannya.org/view_ga_general (access date: 10/3/2023).
10. Sathya N., Muthukumaravel A. A review of the Optimization Algorithms on the Traveling Salesman Problem. Indian Journal of Science and Technology, Vol 8(29), DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i1/84652, November 2015.
11. Genetic Algorithm Tom V. Mathew Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai-400076.
12. Ivanova E.A. "The possibility of applying genetic algorithms in solving scheduling problems" // Colloquium-journal. 2018. No. 3-1 (14). P. 36-38.
13. Dorigo, M. Ant algorithms and stimergy / M. Dorigo, E. Bonabeau, G. Theraulaz // Future Generation Computer Systems. — 2000. — No. 16. — P. 851-871.
14. Chivilikhin D., Ulyantsev V. Inferring Automata-Based Programs from Specification With Mutation-Based Ant Colony Optimization / Proceedings of the 16th Genetic and Evolutionary Computation Conference companion. - ACM, 2014. - p. 68.
15. Alexandrov A., Sergushichev A., Kazakov S., Tsarev F. Genetic Algorithm for Induction of Finite Automaton with Continuous and Discrete Output Actions / Proceedings of the 2011 GECCO Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation. NY. : ACM. 2011, p. 778.
16. Getting Started with MATLAB. Version 6.5. The MathWorks, Inc., 2002.

Received (Надійшла) 06.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 03.04.2024

Порівняльний аналіз застосування евристичних алгоритмів для розв'язання задачі TSP

О. В. Скакаліна, А. М. Капитон

Анотація. Необхідність вирішення задачі комівояжера (TSP) часто виникає при вирішенні практично значущих оптимізаційних задач, таких як задачі в області економіки, логістики в найширшому діапазоні застосувань, в ланцюгах технічних програм. Досить часто специфіка цих задач вимагає отримання рішення, максимально наближеного до точного значення. Але задача TSP є NP-складною, тобто її точний розв'язок можна отримати лише за експоненціальний час. Тому розв'язувати задачу TSP за алгоритмом повного пошуку за наявності великої кількості вершин графа неефективно. Однак існують різноманітні евристичні алгоритми, які дозволяють знайти раціональне рішення цієї задачі з великою кількістю вершин за час, прийнятний для відповідної предметної області. У даній роботі задача комівояжера визначається як задача математичного програмування знаходження найкоротшого шляху руху комівояжера, метою якої є відвідування всіх об'єктів, заданих у задачі в найкоротший термін і з мінімальними витратами. Відповідні адаптації евристичних алгоритмів, а саме генетичного алгоритму та алгоритму мурашиної колонії, розроблені в середовищі MATLAB. Проведено обчислювальний експеримент на вхідній вибірці, проведено порівняльний аналіз продуктивності двох евристичних алгоритмів і доведено ефективність використання евристичних алгоритмів для розв'язування NP-комплексних задач.

Ключові слова: генетичні алгоритми, NP-комплексна задача, TSP-задача, алгоритм мурашиної колонії, MATLAB.

B. Steblyanko, O. Ni, H. Kuchuk, D. Volk

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

FUZZY INTERACTIVE CLUSTERING METHOD

Abstract. The article examines an example of a system in which a large number of short texts are generated. In it, participants create strategic planning documents, within which key performance indicators are determined. The formulations of key performance indicators form a data set consisting of short texts. Within the framework of this system, there is an urgent task of forming and updating a classifier based on this set. A solution to this problem is presented using the fuzzy interactive clustering method. This method allows expert to perform clustering sets of short texts, issuing reverse communication based on the results of each step interactive clustering. Collection procedure reverse does not imply any connection availability of an expert special knowledge about work neural network and is assembled in human-readable form matrices reverse communications. Such an approach has advantages over clustering methods requiring adjustments metaparameters algorithm not related directly with the clustering results. Also important advantage the proposed method is opportunity realize clustering sets data related to various language domains that do not match the domain on which was produced education language models, due to proposed extension method dictionary language models. This property allows use the proposed algorithm in a narrow way specialized domains, as well as in domains that do not allow you to obtain a full-fledged corpus of texts for yourself training language models.

Keywords: clustering, data, decision making, efficiency, neural net.

Introduction

Cluster analysis is one of the most important sections of system data analysis and is used in various problem areas - technical, natural science, social.

Clustering is an example of an unsupervised learning problem and comes down to dividing the original set of objects into subsets of classes in such a way that elements of one class are as similar as possible to each other, and elements of different classes are different.

Traditional cluster analysis methods work with objects specified as vectors signs [1–4]. When working with texts, the first step of the algorithm is clustering is definition space signs and construction in it vectors available texts [5, 6]. Typically received vectors have big dimensions and when working with them traditional cluster analysis methods do not provide sufficient efficiency [7–10].

When working with short texts dimension vectors does not decrease, but only is added property sparsity to feature vectors that creates additional difficulties with them processing by cluster analysis methods [11, 12]. Below the short texts in this research implied texts consisting from one or several sentences with a total number of words ranging from 5 to 100.

In addition, additional complicating factors solution tasks clustering for short texts are: synonymy, homonymy, more frequent, compared to ordinary texts, use abbreviations, slang expressions and neologisms and most the main thing is partial or complete absence context for short texts.

Swift height arrays information consisting from short text sets fragments, contributes intensification research in the field development methods processing texts using machine learning.

Problem annually dedicated to a significant number of studies. Big Part carried out research refers to texts in English language.

In the article an example of a system is considered in which is happening generation big number of short

texts. In it the participants form documentation strategic planning, within the framework of which are determined key indicators efficiency.

Formulations key indicators efficiency form a data set consisting from short texts.

Within these systems acute the task is to form and update classifier based on this set.

This task can be solved with clustering.

Main Part

Modern methods clustering using neural networks are usually used neural network for preparation vectors signs and then used analytical method (based on formulas with hyperparameters) for clustering these signs.

As a result, the result of clustering due to quality received vectors signs, i.e. quality training neural network.

At the same time, in the last time appear methods allowing solve the clustering problem directly using neural network that allows combine process receiving vectors signs and actually clustering.

Sticking to ideas for the researcher most simple and accurate reverse communication there will be criticism received results clustering, in this work supposed reverse connection two types:

1 – “element X_i must belong to the cluster C_j ”;

2 – “element X_i should not be in cluster C_j ”.

Simultaneously may be received arbitrarily the number of such restrictions, in particular, is easily specified restriction “change” elements X_i and X_j in places” combination two restrictions first kind. In Table 1 shows an example of a formalized reverse connections from an expert in the form of a matrix reverse communications.

At the intersection of the line corresponding element (object) from the data set and cluster to which the an object was ranked with the highest degree confidence neural network (maximum value in the corresponding output component vector) is placed reverse connection two the above types in the form “Include” or “Exclude” respectively. in Table 1.

Table 1 – Example of a matrix reverse connections from an expert

| | Cluster 1 | Cluster 2 | ... | Cluster K |
|-----------|-----------|-----------|-----|-----------|
| Element 1 | + | + | ... | turn on |
| Element 2 | + | turn on | ... | + |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| Element N | + | exclude | ... | + |

From generalized scheme methods clustering it is clear that treatment reverse communications at the level single target functions (functions loss, penalty functions, loss function) will allow simultaneously build performance objects in accordance with intention researcher influencing weights neural network and adjust errors clustering influencing the outcome of the next iterations clustering (for example, shifting clusters).

For the presented clustering method it is not difficult to notice that target function is aimed at q_{ij} was more p_{ij} .

If look at private derivatives for updating scales neural network and vectors centre's clusters

$$\frac{\partial L}{\partial z_i} = 2 \sum_{j=1}^J \left(\left(1 + \|z_i - \mu_j\|^2 \right)^{-1} \times \left(p_{ij} - q_{ij} \right) \cdot \left(z_i - \mu_j \right) \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_j} = -2 \sum_{i=1}^I \left(\left(1 + \|z_i - \mu_j\|^2 \right)^{-1} \times \left(p_{ij} - q_{ij} \right) \cdot \left(z_i - \mu_j \right) \right); \quad (2)$$

then it can be understood that in the case negative the difference ($p_{ij} - q_{ij}$) will be the element is “pushed out” from the cluster, despite the absence fine with sides target functions.

In this research for accounting reverse communications user when adjusting scales neural network by inverse method distribution errors offered use following formulas for calculation gradients target Features:

$$L = KL(P \| Q) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J t_{ij} \cdot p_{ij} \cdot \log \frac{p_{ij}}{q_{ij}}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial z_i} = 2 \sum_{j=1}^J \left(\left(1 + \|z_i - \mu_j\|^2 \right)^{-1} \times \left(p_{ij} - q_{ij} \right) \cdot t_{ij} \cdot \left(z_i - \mu_j \right) \right); \quad (4)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_j} = -2 \sum_{i=1}^I \left(\left(1 + \|z_i - \mu_j\|^2 \right)^{-1} \times \left(p_{ij} - q_{ij} \right) \cdot t_{ij} \cdot \left(z_i - \mu_j \right) \right); \quad (5)$$

where $T = (t_{ij})$ is the matrix of feedback multipliers, in which the elements satisfy the conditions:

$$\begin{cases} t_{ij} > 0, & \text{if element } i \text{ is included in the cluster } j; \\ t_{ij} < 0, & \text{if element } i \text{ is excluded from the cluster } j; \\ t_{ij} = 0, & \text{if element } i \text{ remains in the cluster } j. \end{cases}$$

The matrix T is obtained trivially from matrices reverse communication from the expert presented in Table 1.

In the Table 2 shows an example with the result of the transformation matrices reverse connections from an expert to the matrix multipliers for target functions neural network.

Table 2 – Feedback multiplier matrix for the objective function

| | Cluster 1 | Cluster 2 | ... | Cluster K |
|-----------|-----------|-----------|-----|-----------|
| Element 1 | 0 | 0 | ... | 100 |
| Element 2 | 0 | 100 | ... | 0 |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| Element N | 0 | -1000 | ... | 0 |

Absolute meaning t_{ij} defines the speed at which cluster elements and centers will be strive for each other or push away from each other.

Also, on this speed influences exposed level learning rate) for a neural network. In this work in experiments used value 100 to enable element to the cluster and - 1000 to exclude element from the cluster.

These values were determined empirically, because experiments have shown that for the case pushing out element from the cluster has meaning use big absolute magnitudes than with attraction.

Described higher an approach allows enough effectively solve the clustering problem, and in the case of such multidimensional objects as text, to user necessary have opportunity render influence on the course process clustering for the purpose identifying hidden or explicit intentions.

One of main advantages proposed clustering method is that added restrictions are not rigid, do not lead to the need decide systems equations that can potentially turn out to be incompatible.

Any restrictions user, regardless of their internal there will be contradictions taken into account in fines sides target functions

Conclusions

In the article a method of interactive reverse clustering communications at the base modern methods clustering.

Used generalized construction scheme algorithm clustering and proposed architecture neural network allow combine advantages modern language models with high indicators accuracy and perplexity and most currently effective universal algorithms clustering.

Language blocks model and clustering in the proposed architecture artificial neural network with time can be easily replaced with blocks of more modern and efficient language models and methods clustering without the need changes proposed algorithm.

This method allows expert to perform clustering sets of short texts, issuing reverse communication based on the results of each step interactive clustering. Collection procedure reverse does not imply any connection availability of an expert special knowledge about work neural network and is assembled in human-readable form matrices reverse communications. Such an approach has advantages over clustering methods requiring adjustments

metaparameters algorithm not related directly with the clustering results. Expert in such methods interacts with the algorithm as a “black box” model, which reduces efficiency man-machine interactions.

Also important advantage the proposed method is opportunity realize clustering sets data related to various language domains that do not match the domain on which was produced education language models, due to proposed extension method dictionary language models This property allows use the proposed algorithm in a narrow way specialized domains, as well as in domains that do not allow you to obtain a full-fledged corpus of texts for yourself training language models.

REFERENCES

- McCann, B., Bradbury, J., Xiong, C., Socher R. (2017), Learned in Translation: Contextualized Word Vectors. *NIPS*. I. Guyon, U. von Luxburg, S. Bengio, H.M. Wallach, R.Fergus, S.V.N. Vishwanathan, R. Garnett (eds). P. 6297-6308.
- Meier B.B., Elezi, I., Amirian, M., Dürr, O., Stadelmann, T. (2018), “Learning Neural Models for End-to-End Clustering”, *Artificial Neural Networks in Pattern Recognition*, Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham. / L. Pancioni, F. Schwenker, E. Trentin (eds.). Vol 11081.
- Kammoun, N., Abassi, R., Guemara, S. (2019). Towards a new clustering algorithm based on trust management and edge computing for IoT. 2019 15th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IWCMC 2019, 1570–1575, 8766492. doi: <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2019.8766492>
- Kovalenko, A., Kuchuk, H. (2022), Methods to Manage Data in Self-healing Systems. *Studies in Systems, Decision and Control*, 425, 113–171. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96546-4_3
- Yang, J., Bao, L., Liu, W., Yang, R., Wu, C.Q. (2023). On a Meta Learning-Based Scheduler for Deep Learning Clusters. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 11(4), 3631–3642. doi: <https://doi.org/10.1109/TCC.2023.3308161>
- 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>
- 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>
- 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>
- Kuchuk, N., Mozhaiev, O., Semenov, S., Haichenko, A., Kuchuk, H., Tiulieniev, S., Mozhaiev, M., Davydov, V., Brusakova, O., Gnusov, Y. (2023). Devising a method for balancing the load on a territorially distributed foggy environment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(4 (121)), 48–55. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.274177>
- Kuchuk, N., Kovalenko, A., Ruban, I., Shyshatskyi, A., Zakovorotnyi, O., Sheviakov, I. (2023). Traffic Modeling for the Industrial Internet of NanoThings. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology*, KhPI Week 2023 - Conference Proceedings, 2023, doi: 194480. <http://dx.doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312856>
- G. Khoroshun, O. Ryazantsev, and M. Cherpitskyi, “Clustering and anomalies of USA stock market volatility index data”, *Advanced Information Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 9–15, Jun. 2023. doi: 10.20998/2522-9052.2023.2.02.
- 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>

Received (Надійшла) 27.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.04.2024

Метод нечіткої інтерактивної кластеризації

Б. О. Стебляк, О. В. Ні, Г. А. Кучук, Д. М. Волк

Анотація. У статті досліджується приклад системи, де відбувається генерація великої кількості коротких текстів. У ній учасники формують документи стратегічного планування, у яких визначаються ключові показники ефективності. Формування ключових показників ефективності утворюють відповідний набір даних. У рамках цієї системи гостро стоїть завдання формування та актуалізації класифікатора, заснованого на даному наборі даних. Наведено розв'язання цієї задачі за допомогою методу нечіткої інтерактивної кластеризації. Даний метод дозволяє експерту проводити кластеризацію наборів коротких текстів, надаючи зворотний зв'язок за результатами кожного етапу інтерактивної кластеризації. Процедура зворотного зв'язку не передбачає наявності у експерта спеціальних знань про роботу нейронної мережі та збирається у вигляді матриці зворотного зв'язку, яку може прочитати людина. Такий підхід має переваги в порівнянні з методами кластеризації, що вимагають коригування метопараметрів алгоритму, не пов'язаних безпосередньо з результатами кластеризації. Також важливою перевагою запропонованого методу є можливість здійснювати кластеризацію наборів даних, що відносяться до різних мовних доменів, що не збігаються з доменом, на якому проводилося навчання мовної моделі, за рахунок запропонованого методу розширення словника мовної моделі. Ця властивість дозволяє використовувати запропонований метод у вузько спеціалізованих доменах, а також у доменах, що не дозволяють отримати повноцінний кортеж текстів для навчання мовної моделі.

Ключові слова: кластеризація, дані, прийняття рішень, ефективність, нейронна мережа.

О. В. Шматко, С. С. Сальніков

Харківський національний технічний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МОДЕЛЬ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОБМІНУ ЕЛЕКТРИЧНИМИ МЕДИЧНИМИ КАРТКАМИ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН

Анотація. Актуальність. У сучасну цифрову епоху безпека даних стає першорядною турботою в різних секторах, особливо в охороні здоров'я. Критичний характер даних пацієнтів вимагає надійних механізмів захисту від несанкціонованого доступу та потенційного зловмисного використання. У цій статті розглядається мінливий ландшафт безпеки даних в секторі охорони здоров'я, підкреслюються уразливості, пов'язані з традиційними системами зберігання даних. В роботі пропонується модель системи для збору, зберігання та обміну електронними медичними картками (Electronic Health Records – EHR). В роботі досліджено технологію блокчейн як революційний підхід до вирішення проблем безпеки обміну конфіденційними медичними даними. **Метою даної роботи** є підвищення конфіденційності медичних даних, їх цілісності та доступності, а також забезпечення надійного обміну цими даними між медичними закладами та іншими учасниками за рахунок проектування та розробки програмних компонентів для створення захищених систем передачі медичної інформації на основі технології блокчейн. **Об'єкт дослідження** включає в себе системи передачі медичної інформації, які забезпечують обмін даними між медичними закладами, спеціалістами та пацієнтами, забезпечуючи конфіденційність, цілісність та доступність цих даних. **Предметом дослідження** є методи та засоби проектування та розробки програмних компонентів, необхідні для створення і підтримки захищених систем передачі медичної інформації. Ці компоненти включають в себе програмне забезпечення для шифрування, аутентифікації, авторизації, а також механізми для забезпечення відмовостійкості та відновлення даних. **Результати.** У даній роботі запропоновано модель децентралізованої системи для збору, зберігання та обміну EHR. **Висновок.** Результати цього дослідження підкреслюють трансформаційний потенціал технології блокчейн у переосмисленні парадигм безпеки даних у секторі охорони здоров'я. Створюючи безпечну, прозору та ефективну платформу для управління EHR, запропонована модель не тільки підвищує конфіденційність та цілісність медичних даних, але й робить значний внесок у покращення якості надання медичної допомоги та результатів лікування пацієнтів. У міру просування вперед впровадження децентралізованих систем, заснованих на технології блокчейн, в охороні здоров'я являє собою багатообіцяючий шлях для вирішення складних проблем, пов'язаних з безпекою і конфіденційністю даних, тим самим прокладаючи шлях до більш стійкої і орієнтованої на пацієнта екосистеми охорони здоров'я.

Ключові слова: блокчейн, електронні медичні картки, смарт-контракти, Ethereum, MetaMask, архітектурна модель.

Вступ

Діагностичні дані пацієнтів збільшуються, кількість медичних інформаційних систем (МІС) зростає. Як результат, кількість інформації про пацієнта збереженої на цифрових носіях – збільшується [1, 2]. Потреба у функціональному змісті цих систем також зростає.

Незважаючи на те, що системи МІС зараз широко застосовуються в Україні, їх область застосування наразі включає лише первинну медицину. Значна частина лікарів досі використовують паперові носії у своїй роботі.

В Україні буде впроваджена електронна система охорони здоров'я eHealth, яка гарантує права пацієнтів щодо якості медичних послуг та оптимізує взаємодію між пацієнтом та лікарем шляхом автоматизації, медичного обліку та електронного управління медичною інформацією.

eHealth складається з центральної бази та великого розмаїття МІС. Центральна база даних Україні забезпечує прозорість витрат охорони здоров'я та можливість руху інформації без паперів з поступовим переходом до електронного обліку, включаючи електронні рецепти, електронні картки та електронні довідки, створювати нові електронні послуги, створення ділового середовища, створення інноваційних продуктів у медицині та просування медичного ринку ІТ загалом.

Завдяки швидкому доступу до всієї інформації про пацієнта, лікар отримує цілісне уявлення про ваше здоров'я, а повний анамнез в електронній формі допомагає поставити правильний діагноз. Більшість медичних послуг можна отримати, не виходячи з дому. Модель фінансування медичних закладів з допомогою системи eHealth кардинально змінилася. Діє принцип – «гроші йдуть за пацієнтом». Система дозволяє контролювати ефективність, з якою витрачаються державні кошти. Перш за все, eHealth охопить основну допомогу: лікарі загальної практики, терапевти та педіатри. Пацієнти підписують заяви від вибраних лікарів, а лікарі реєструють їх у системі. Це допоможе державі оплатити роботу лікаря з кожним пацієнтом.

Захист прав пацієнтів на конфіденційність медичних даних стає дедалі складнішим із появою електронних медичних записів (EHR), якими обмінюються на різних рівнях системи охорони здоров'я. Така розширена можливість підключення різних користувачів медичних даних збільшує ризик порушень, створюючи значну загрозу для закладів охорони здоров'я. Враховуючи делікатний характер медичних записів, будь-яке порушення конфіденційності може призвести до серйозних наслідків, включаючи наклеп, дискримінацію та невиправданий стрес як для пацієнтів, так і для опікунів. Забезпечення конфіденційності та цілісності медичних записів вимагає суворого контролю доступу до EHR, а також

збереження їх цілісності для запобігання несанкціонованим змінам або знищенню [3].

В роботі [4] описується структура безпеки, розроблена для створення захищеної, адаптованої та надійної системи EHR, що задовольняє нагальну потребу в передових заходах безпеки у світлі вразливостей, властивих існуючим системам. Автори узагальнюють існуючі дослідження безпеки EHR, що висвітлюють різні стратегії безпеки, що включають адміністративні, фізичні та технічні запобіжні заходи, необхідні для захисту складної екосистеми охорони здоров'я. Незважаючи на ці досягнення, існує чітка потреба в кращих рішеннях безпеки для конкретних установ, які відповідають мінливим вимогам майбутніх організацій охорони здоров'я.

Кілька досліджень [5-8] сприяють цьому дискусію, представляючи рамки та моделі, які вирішують багатогранні проблеми безпеки в інформаційних системах охорони здоров'я. Наприклад, концептуальна основа, запропонована в роботі [9] підкреслює відмінності в методах безпеки в різних лікарнях і виступає за етичне управління електронними медичними записами в усьому спектрі охорони здоров'я. Тим часом у дослідженні [10] підкреслюється, що дотримання правил HIPAA є наріжним каменем забезпечення безпеки медичної інформації, що передбачає всебічне дотримання цих рекомендацій як стандарту для організацій охорони здоров'я.

Інші матеріали [11-13], пропонують клієнт-серверні моделі та їх дослідження в системах обміну медичними даними. Автори роботи [13] дають уявлення про пом'якшення внутрішніх загроз в медичних установах, використовуючи інструменти дерева атак для детального аналізу потенційних порушень безпеки.

Інноваційні рішення, такі як модель контролю доступу [14] на основі смарт-контрактів пропонують структуру фреймворку для зниження ризиків хакерських атак. Не менш заслуговують на увагу запропонована архітектура хмарних сховищ даних [15], яка може забезпечити підвищений ступінь безпеки для передачі інформації на аутсорсинг в середовищі хмарних обчислень із залученням численних незалежних хмарних провайдерів. Фреймворк включає в себе методи подвійного шифрування і фрагментації даних, які забезпечують безпечно поширення інформації в мультихмарному середовищі. В роботі [16] запропоновано гібридну архітектуру для доступу до записів пацієнтів із збереженням конфіденційності в хмарній системі. Пропонований фреймворк дозволяє пацієнтам керувати доступом до своїх медичних записів, полегшуючи безперешкодний обмін даними між ними медичні установи, забезпечуючи при цьому наявність протоколів екстреного доступу. Автори роботи [17] розглядають технологію розподіленого реєстру (DLT), відому як IOTA. IOTA вирішує проблеми пов'язані з масштабованістю та продуктивністю блокчейну, використовуючи структуру спрямованого ациклічного графіка (DAG), що полегшує паралельне додавання транзакцій. Це нововведення значно скорочує час підтвердження транзакції і дозволяє обробляти необмежену кількість транзакцій одночасно. Протокол обміну повідомленнями з замаскованою аутентифікацією

(MAM) в IOTA забезпечує безпечну передачу зашифрованих потоків даних у вигляді транзакцій.

Аналіз останніх досліджень підкреслює необхідність застосування передових, спеціально розроблених заходів безпеки для зміцнення цілісності та конфіденційності систем EHR, тим самим захищаючи приватне життя пацієнтів і підвищуючи стійкість інформаційних систем охорони здоров'я до виникаючих загроз.

Виходячи з аналізу останніх досліджень і публікацій можна зробити висновок, що питання проектування та розробки інформаційних систем для збору, зберігання та обробки електронних медичних карток на основі технології блокчейн є актуальним.

Метою цієї роботи є підвищення конфіденційності медичних даних, їх цілісності та доступності, а також забезпечення надійного обміну цими даними між медичними закладами та іншими учасниками за рахунок проектування та розробки програмних компонентів для створення захищених систем передачі медичної інформації на основі технології блокчейн.

Основна частина

Традиційний підхід до використання технологій зберігання та обробки медичних даних передбачає централізацію зберігання даних в хмарі, що викликає серйозні проблеми з безпекою доступу до даних і контролю за ними. У сфері охорони здоров'я, де дані пацієнтів є одночасно критичними та конфіденційними, забезпечення надійних заходів безпеки для інформації, що зберігається в хмарі, має першорядне значення [18]. Пацієнти повинні мати право диктувати дозволи на доступ до своїх даних, що вимагає створення безпечного та контрольованого середовища для зберігання даних у хмарі. Щоб вирішити ці проблеми безпеки, автори роботи звернулися до перевірених можливостей технології блокчейн. Серед безлічі блокчейн-платформ Ethereum виділяється своїми чудовими функціями безпеки, що робить його нашим вибором для цього додатка. Причини вибору Ethereum включають такі:

Налагоджена мережа Ethereum: завдяки своєму великому послужному списку мережа Ethereum є одночасно великою і перевіреною часом, забезпечуючи надійну і безпечну основу для додатків.

Функціональність і смарт-контракти: багатий набір функцій Ethereum, зокрема підтримка смарт-контрактів, забезпечує безпечно і децентралізоване зберігання даних, що робить його ідеальним вибором для нашої системи.

Активна підтримка спільноти: Ethereum отримує вигоду від надійної та активної спільноти, яка постійно досліджує інноваційні способи вдосконалення технології.

Використовуючи ці переваги, авторам розроблено смарт-контракт на базі Ethereum, призначений для полегшення спілкування між пацієнтами та лікарями. Цей смарт-контракт спрощує процес спостереження лікарів за своїми пацієнтами, підвищуючи ефективність і безпеку взаємодії пацієнта і лікаря.

Концептуальна архітектура запропонованої системи інтегрує технологію блокчейн в систему обміну медичними даними, як показано на рис. 1.



Рис. 1. Концептуальна архітектура системи, що пропонується (джерело: власна розробка)

В запропонованій моделі дані пацієнта надійно шифруються та зберігаються в хмарі, гарантуючи, що конфіденційна інформація залишається захищеною протягом усього процесу її зберігання та обміну. На рис. 2 показана схема роботи системи всякий раз, коли пацієнт вибирає перегляд медичних записів за допомогою MetaMask або децентралізованого веб-сайту системи обміну EHR. Отримуючи доступ до приватного ключа з гаманця Ethereum, користувач автоматично входить в систему.

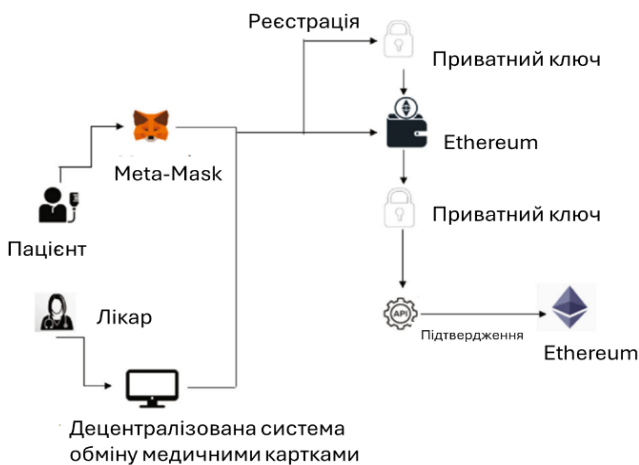


Рис. 2. Схема протоколу системи обміну EHR

Ethereum wallet - це гаманець для холодного зберігання. В результаті, порівняння з іншими гарячими гаманцями, небезпека компрометації досить низька. Крім того, якщо гаджет втрачено, пацієнтам можна просто видати новий, не піддаючись штрафу за втрату своїх медичних записів. Гаманець можна використовувати для підпису будь-яких документів або для інших потреб при перевірці особистості. Цей гаманець також можна використовувати для проведення багатосторонньої верифікації пацієнта. Він може бути використаний для створення системи контролю доступу до записів на основі ролей, а також системи розподіленої ідентифікації власності на основі блокчейна. У випадку невідкладної медичної допомоги може бути реалізований аналогічний багатосторонній механізм отримання дозволів для отримання доступу до записів пацієнтів.

На рис. 3 показана структурна схема. Дизайн, який ми пропонуємо, складається з чотирьох основних компонентів: Користувач додаток, протокол

рукописання блокчейна, хмара і загальнодоступна блокчейн-мережа. Система являє собою віртуальне представництво, яке служить двом цілям. По-перше, він надає користувачам доступ до інтерфейсів додатків. Лікарі та системні адміністратори - це два типи користувачів у нашій системі.

У кожного користувача є своя функція. В результаті користувальницький додаток надає різні інтерфейси користувача залежно від ролі користувач. По-друге, на основі введених користувачем даних користувальницький додаток створює початкову транзакцію. З метою підтвердження транзакція відправляється в протокол рукописання блокчейна. Нарешті, користувальницький інтерфейс встановлює зв'язок між користувачами і протоколом рукописання блокчейна.

Фундаментальним компонентом запропонованої архітектури є протокол blockchain handshake (BH). Цей компонент з'єднує сервер бази даних, блокчейн-мережу і хмарну систему медичних записів, яка діє як оболонка. Ця запропонована Архітектура використовує блокчейн-мережу Ethereum. Розподілена бухгалтерська книга, що з'єднує блокчейн-вузли, відома як публічна блокчейн-мережа. Блокчейн-вузли - це майнери, які відповідають за оновлення блокчейна на основі методу прийняття рішення. В якості альтернативи блокчейн-вузли приймають транзакції і використовують смарт-контракти мережі для їх аутентифікації. У запропонованому проекті хмара надає дві послуги, які аналогічні тим, які надаються існуючими хмарними сервісами.

Системи адміністрування EHR. Система адміністрування EHR розміщується в якості початкової служби. Зберігання даних-це наступна послуга. Всі медичні записи можуть бути збережені в базі даних. Система адміністрування EHR приймає транзакції з протоколу рукописання блокчейна, виконує всі обов'язки, пов'язані з ними, і, нарешті, зберігає їх в хмарній базі даних. У відповідь на запити користувачів про доступ хмара надає необхідні дані. На рис. 3 показана структурна схема взаємодії компонентів системи. Дизайн, який пропонується в роботі, складається з чотирьох основних компонентів:

Додаток користувача, протокол рукописання блокчейна, хмарне сховище і загальнодоступна блокчейн-мережа. Система являє собою віртуальне представництво, яке служить двом цілям. По-перше, воно надає користувачам доступ до інтерфейсів додатків. Лікарі та пацієнти - це два типи користувачів у нашій системі.

У кожного користувача є своя функція. В результаті користувацький додаток надає різні інтерфейси користувача залежно від ролі користувача. По-друге, на основі введених користувачем даних користувацький додаток створює початкову транзакцію. З метою підтвердження транзакція відправляється в протокол рукописання блокчейна. Нарешті, користувацький інтерфейс встановлює зв'язок між користувачами і протоколом рукописання блокчейна. Фундаментальним компонентом запропонованої архітектури є протокол рукописання блокчейн (blockchain handshake - BH). Цей компонент з'єднує сервер бази даних, блокчейн-мережу і хмарну систему медичних записів, яка діє як оболонка. Запропонована архітектурна модель використовує блокчейн-мережу Ethereum. Розподілений реєстр, що з'єднує блокчейн-вузли, відома як публічна блокчейн-мережа. Блокчейн-вузли - це майнери, які відповідають за оновлення блокчейна на основі методу прийняття рішення.

В якості альтернативи блокчейн-вузли приймають транзакції і використовують смарт-контракти мережі для їх аутентифікації.

У запропонованому проекті хмара надає дві послуги, які аналогічні тим, які надаються існуючими хмарними сервісами.

Система адміністрування EHR. Система адміністрування EHR розміщується в якості початкової служби. Зберігання даних-це наступна послуга. Всі медичні записи можуть бути збережені в базі даних.

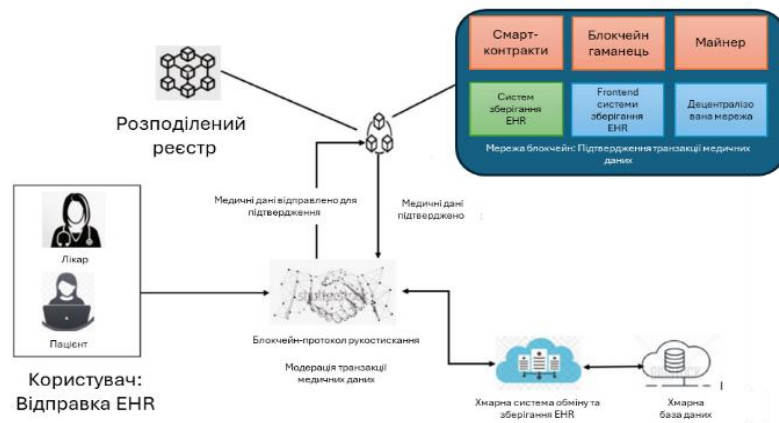
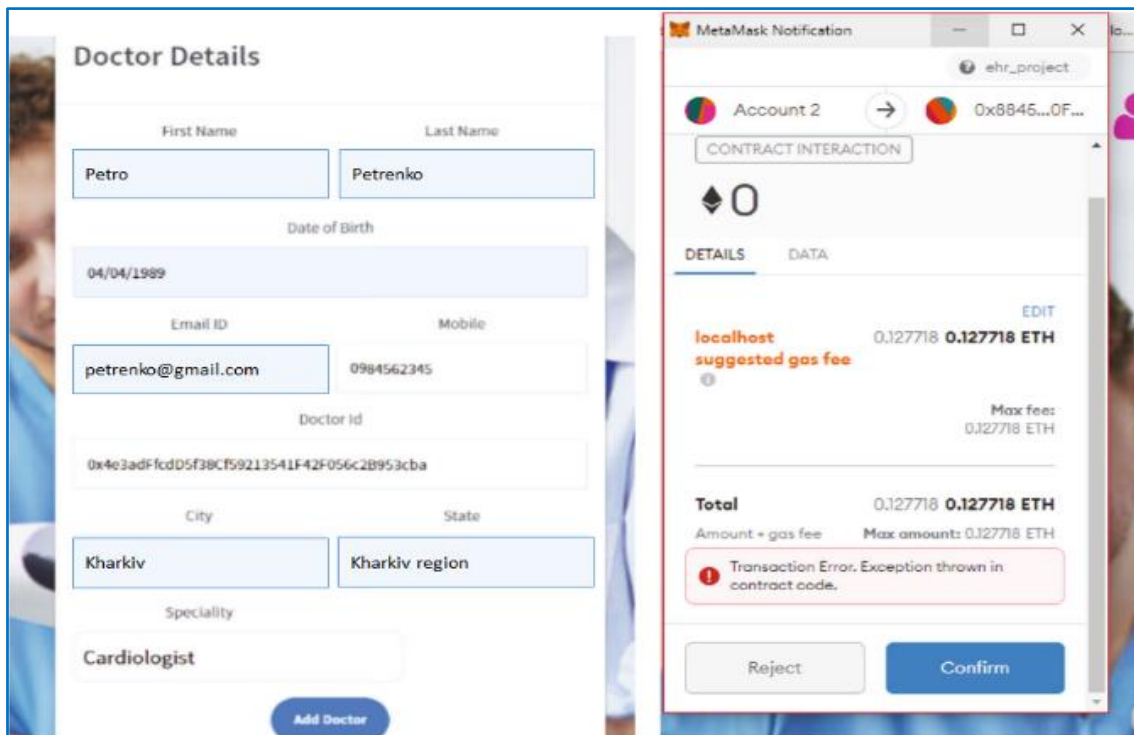


Рис. 3. Структурна схема взаємодії компонентів системи

Система адміністрування EHR приймає транзакції з протоколу рукописання блокчейна, виконує всі обов'язки, пов'язані з ними, і, нарешті, зберігає їх в хмарній базі даних. У відповідь на запити користувачів про доступ хмара надає необхідні дані.

Розглянемо процес отримання доступу до даних в розробленій системі. Ця система побудована з використанням Truffle і Ganache, двох простих у використанні інструментів для створення локального блокчейна Ethereum. Сервер і внутрішня частина системи розроблено з використанням мови Solidity і Node.js. Для створення блокчейна і доступу до системи використовуються віртуальний інтерфейс Ethereum, MetaMask (в якості гаманця), Truffle (в якості IDE), використовуються Yarn (інтерфейс командного рядка), Ganache (створення облікового запису) та Local Web3 (веб-інтерфейс).

Додавання лікаря. На рис. 4 показаний процес додавання лікаря.



а

б

Рис. 4. Додавання даних про лікаря

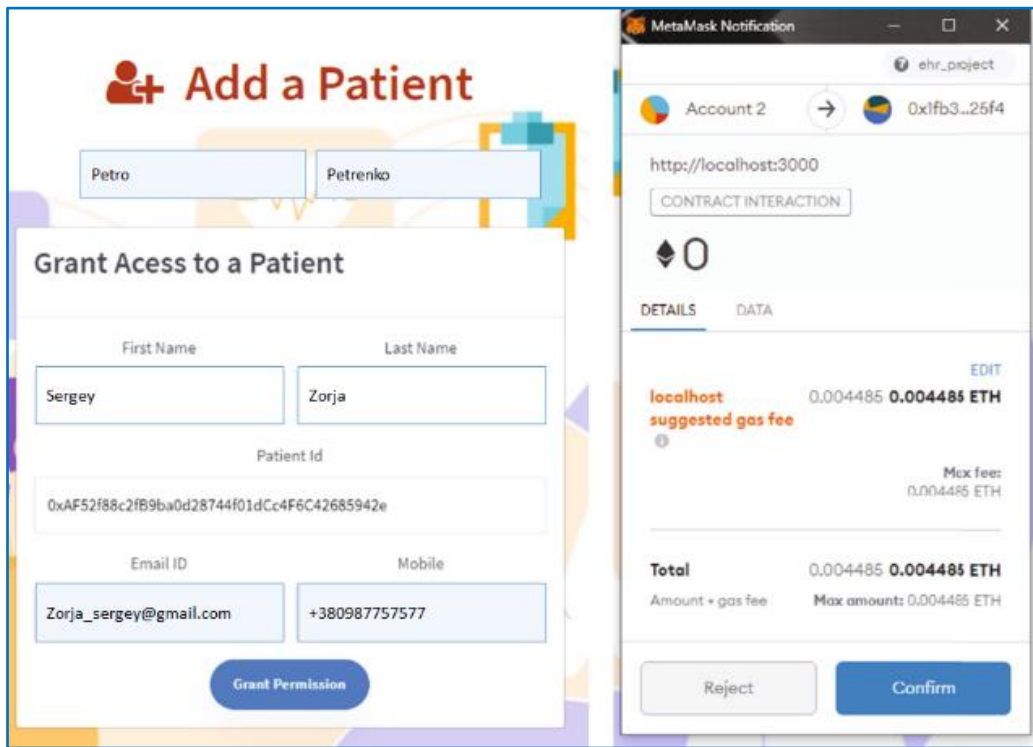
На рис. 4, а показаний модуль реєстрації лікаря, де потрібно заповнити дані лікаря, такі як ім'я; дата народження; ідентифікатор електронної пошти; номер мобільного телефону; ідентифікатор лікаря, який є адресою облікового запису в Ganache Ethereum; Місто; Держава; і спеціальність. На рис. 4, б показано повідомлення про підтвердження від MetaMask, який використовується в якості смарт-контракту. За допомогою MetaMask буде збережена вся інформація про лікаря, і система отримає повідомлення з підтвердженням аутентифікації. Але, якщо користувач використовує невірну інформацію або адресу облікового запису, що вже існує, система видасть повідомлення про відмову в доступі. Нарешті, цей смарт-контракт забезпечує безпеку даних лікаря.

Додавання пацієнта. На рис. 5 описаний метод додавання пацієнт. На рис. 5, а показаний модуль реєстрації пацієнтів, що вимагає введення інформації про пацієнтів, наприклад імена, адреси електронної пошти, номери телефонів та ідентифікатори

пацієнтів, які є адресою облікового запису Ganache Ethereum.

Після заповнення заповнивши всі прогалини необхідною інформацією, Користувач потрібно натиснути кнопку "Додати пацієнта", щоб зберегти дані, а потім переходити до наступного процесу. Підтверджує повідомлення від MetaMask, яке використовується в якості смарт-контракту, показано на рис. 5, б. Вся інформація про пацієнта буде збережена за допомогою MetaMask, і система отримає повідомлення з підтвердженням аутентифікації. Щоб зберегти всі дані, повідомлення MetaMask відображає на екрані детальний курс валюти Ethereum. Він зберігає всі дані в форматі валюти Ethereum. Система відобразить повідомлення про заборону доступу, якщо користувач введе невірну інформацію або та ж адреса облікового запису. Нарешті, безпека самого дані пацієнта захищені цим смарт-контрактом.

Рис. 6 ілюструє персональний блокчейн Ganache



а

б

Рис. 5. Додавання даних про пацієнта

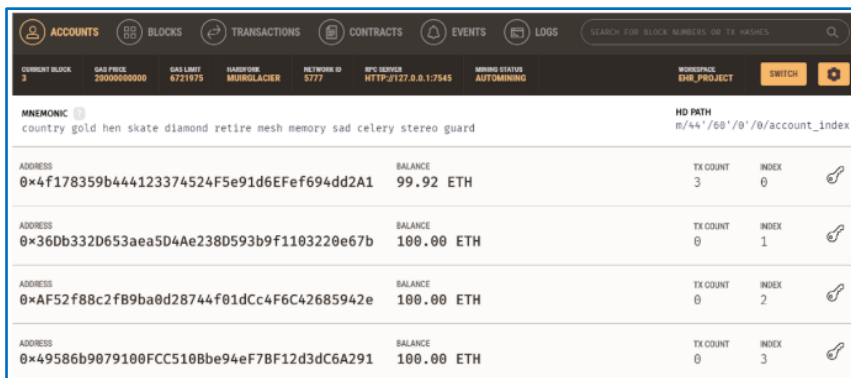


Рис. 6. Персональний блокчейн Ganache

Він був використаний для тестування і розгортання системи. Для тестування та локальної розробки Ganache пропонує кілька віртуальних облікових записів зі 100 ETH. Він забезпечує можливості, порівнянні з Ganache, при розгортанні в основній мережі Ethereum. Деякі з підроблених транзакцій виконуються віртуальними обліковими записами в додатку разом з хешами транзакцій і адресою контракту, на який вони були розгорнуті. Значення валюти кожної транзакції також відображається у стовпці.

Першим кроком на серверній частині є завантаження і установка Ganache з набору Truffle Suite.

Підключення до сервера за допомогою Smart-контракту. На рис. 7 показано підключення системи за допомогою смарт-контрактів.

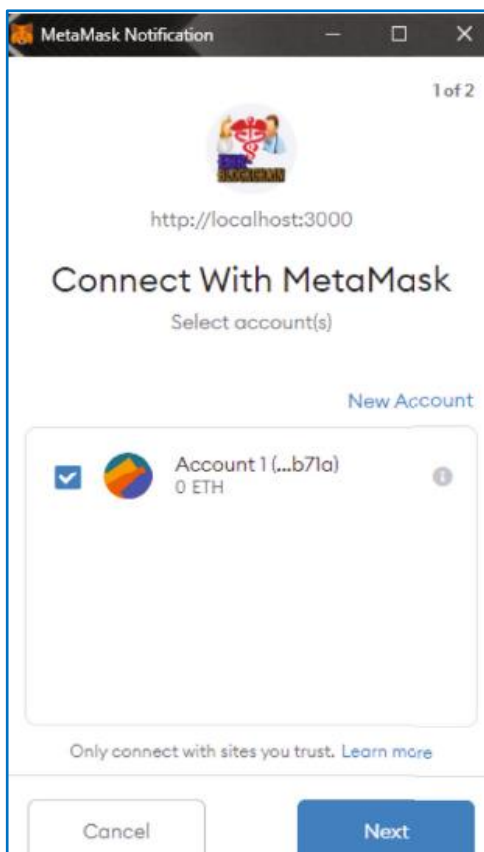


Рис. 7. Підключення до гаманця MetaMask

MetaMask використовується в якості смарт-контракту для підключення до системи. Створюються контракти, які надають метадані по назвах записів, доступі та цілісності даних. Додаються криптографічно підписані інструкції для управління цими характеристиками у блокчейн-транзакціях цієї системи. Використовуються лише операції, що забезпечують зміну даних функціональними можливостями переходу стану контракту для виконання політик. До тих пір, поки медична карта може зберігатися в електронному вигляді, ці контракти можуть бути створені для забезпечення дотримання будь-якого набору правил, що контролюють її.

Цей смарт-контракт, заснований на технології блокчейн, може бути розроблений таким чином, щоб включати в себе всі умови, такі як обробка різних

дозволів та доступ до даних. Можна помітити, що в цій схемі задіяний ряд зацікавлених сторін, кожен з них виконує різні завдання. Це полегшить спілкування лікарів і пацієнтів. Smart-контракти включають в себе правила авторизації даних. Це також може допомогти у відстеженні всіх дій, пов'язаних з унікальним ідентифікатором, від точки походження до точки відправки. Були створені усі функції і процедури, які включені в смарт-контракти. Для підвищення ефективності всі дані медичної карти зберігаються в локальній базі даних.

Створення облікового запису за допомогою Smart-контракту. На рис. 8 показано покроковий процес створення облікового запису.

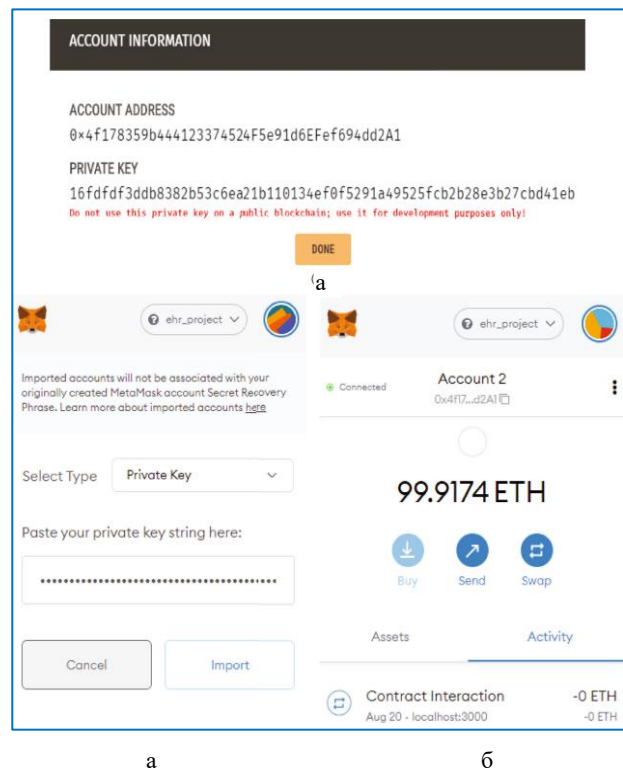


Рис. 8. а – Ganache Ethereum (адреса облікового запису), б – додавання приватного ключа, с – створення облікового запису

На рис. 8, а показана інформація про обліковий запис Ganache Ethereum, який дозволяє користувачам використовувати браузер для доступу до децентралізованої системи без наявності повноцінного вузла блокчейна. На рисунку 8.б показано імпорт приватних ключів через MetaMask, який гарантує можливість реалізації контрактів. Захищений паролем Ethereum wallet - це частина програмного забезпечення, яке може використовуватися для зберігання секретних ключів і для підпису, авторизації та управління транзакціями з використанням електронних медичних карт. Секретні ключі лікаря і пацієнта будуть зберігатися в метамаск-гаманці, який може бути використаний скрізь, де потрібен дозвіл на використання закритого ключа. На рисунку 8.с показано ідентифікатор облікового запису із Ganache на гаманець Ethereum, де гаманець MetaMask потім підключиться до системи і буде функціонувати відповідно до

ehr_project. В запропонованій системі використовуються блокчейн заради безпеки даних і прозорість. У цій архітектурі будь-які спроби незаконного використання заборонені. Таким чином, система вважається однією з найбезпечніших платформ порівняно з іншими платформами електронної охорони здоров'я.

Виконаємо порівняння архітектури нашої системи з архітектурою існуючих систем охорони здоров'я. Порівняння базується на ключових характеристиках різних систем охорони здоров'я. Порівняння показано в табл. 1.

Кожна транзакція в мережі Ethereum вимагає витрат на газ. Іншими словами, газ - це свого роду готівкові гроші, які можуть бути використані для

проведення будь-якої транзакції. Оскільки плата за газ в мережі Ethereum настільки висока, пропонується зберігати там не всі типи даних пацієнтів.

В результаті було прийнято рішення зберегти в Ethereum тільки окремі хмарні адреси, що тягне за собою невелику плату за газ.

З іншого боку, наша система є більш ефективною, ніж будь-яка інша система. Графік залежності плати за газ від розміру вхідних даних у байтах показано на рис. 9.

На цьому графіку можна наочно бачити, що при збільшенні розміру даних плата за газ автоматично збільшується. Таким чином, розмір даних, що зберігаються в блокчейн, повинен бути якомога менше.

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця між запропонованим методом та існуючими

| Параметри | Smart glucose monitoring system [19] | Secure her: healthblock [20] | Healthcare provisioning ecosystem [21] | Запропонована система |
|--|--------------------------------------|------------------------------|--|-----------------------|
| Дистанційне спостереження за пацієнтом | Ні | Ні | Так | Так |
| Дистанційне виявлення захворювань пацієнта | Ні | Ні | Ні | Ні |
| Використання датчиків | Так | Ні | Так | Так |
| Рекомендації щодо автентифікації користувача | Ні | Ні | Ні | Так |
| Зберігання даних в блокчейн | Так | Так | Так | Так |
| Використання криптографічних функцій | Ні | Так | Ні | Так |

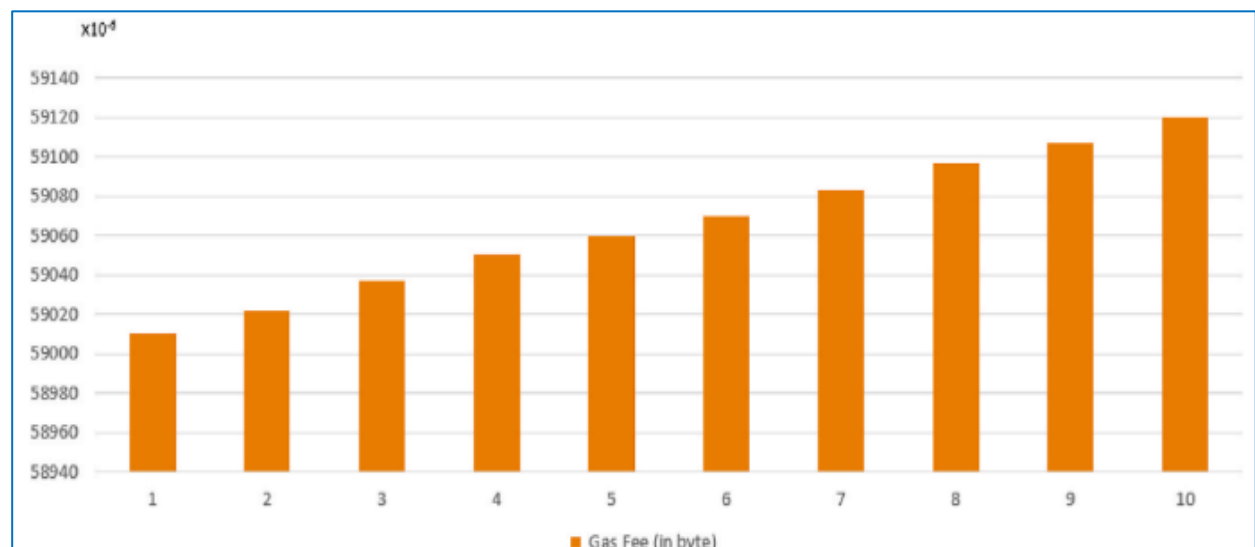


Рис. 9. Газ, який використовується під час транзакції в Ethereum

Висновки

У секторі охорони здоров'я безпека даних сьогодні набуває все більшого визнання. Отож, щоб подолати цю проблему, в роботі запропоновано використання технології блокчейн з метою забезпечення конфіденційності. Запропонована модель архітектури системи обміну медичними даними в першу чергу призначена для віддаленого догляду за пацієнтами, а

також для пріоритетного захисту конфіденційних медичних записів пацієнтів. Для забезпечення безпеки даних в роботі запропоновано блокчейн на основі Ethereum, який вважається одним з найбільш ефективних методів, використовуваних для забезпечення безпеки даних. Також пропонується використання асиметричної криптографії для хешування даних, що робить транзакції більш безпечними, ніж у інших системах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Левківський, В. Л. (2023). Аналіз структури та функціональних можливостей медичних інформаційних систем України. Вестник Херсонського національного технічного університету, (3 (86)), 111-118.

2. Bedianashvili, g., Zhosan, h., & lavrenko, s. (2022). Modern digitalization trends of Georgia and Ukraine. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture & Rural Development*, 22(3).
3. Корчинський, І. О., & Фірман, Н. А. (2022). Цифрова медицина: особливості та проблеми становлення в Україні. *Цифрова економіка та економічна безпека*, (1 (01)/), 100-105.
4. Keshta, I., & Odeh, A. (2021). Security and privacy of electronic health records: Concerns and challenges. *Egyptian Informatics Journal*, 22(2), 177-183.
5. Shi, S., He, D., Li, L., Kumar, N., Khan, M. K., & Choo, K. K. R. (2020). Applications of blockchain in ensuring the security and privacy of electronic health record systems: A survey. *Computers & security*, 97, 101966.
6. Hathaliya, J. J., & Tanwar, S. (2020). An exhaustive survey on security and privacy issues in Healthcare 4.0. *Computer Communications*, 153, 311-335.
7. Thapa, C., & Camtepe, S. (2021). Precision health data: Requirements, challenges and existing techniques for data security and privacy. *Computers in biology and medicine*, 129, 104130.
8. Mayer, A. H., da Costa, C. A., & Righi, R. D. R. (2020). Electronic health records in a Blockchain: A systematic review. *Health informatics journal*, 26(2), 1273-1288.
9. Goodman, K. W. (2020). Ethics in health informatics. *Yearbook of medical informatics*, 29(01), 026-031.
10. Yigzaw, K. Y., Olabarriaga, S. D., Michalas, A., Marco-Ruiz, L., Hillen, C., Verginadis, Y., ... & Chomutare, T. (2022). Health data security and privacy: Challenges and solutions for the future. *Roadmap to Successful Digital Health Ecosystems*, 335-362.
11. Ismail, L., Materwala, H., & Sharaf, Y. (2020, October). Blockhr—a blockchain-based healthcare records management framework: performance evaluation and comparison with client/server architecture. In *2020 International symposium on networks, computers and communications (ISNCC)* (pp. 1-8). IEEE.
12. Li, W., Wang, S., Xie, W., Yu, K., & Feng, C. (2023). Large scale medical image online three-dimensional reconstruction based on WebGL using four tier client server architecture. *Information Visualization*, 22(2), 100-114.
13. Xu, L., Xu, C., Liu, J. K., Zuo, C., & Zhang, P. (2020). Building a dynamic searchable encrypted medical database for multi-client. *Information Sciences*, 527, 394-405.
14. Saini, A., Zhu, Q., Singh, N., Xiang, Y., Gao, L., & Zhang, Y. (2020). A smart-contract-based access control framework for cloud smart healthcare system. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(7), 5914-5925.
15. Seth, B., Dalal, S., Jaglan, V., Le, D. N., Mohan, S., & Srivastava, G. (2022). Integrating encryption techniques for secure data storage in the cloud. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 33(4), e4108.
16. Guo, H., Li, W., Nejad, M., & Shen, C. C. (2022). A hybrid blockchain-edge architecture for electronic health record management with attribute-based cryptographic mechanisms. *IEEE Transactions on Network and Service Management*.
17. Golubnychy, D., Kolomyitsev, O., Tretyak, V., Kliuchka, Y., & Rybalchenko, A. (2022). Архітектура системи обміну медичними даними пацієнтів з лікарями на основі ІОТА. Системи управління, навігації та зв'язку. *Збірник наукових праць*, 1(67), 57-61.
18. Ключка, Я. О., Шматко, О. В., Євсєєв, С. П., & Милевський, С. В. (2021). Peculiarities of blockchain technology introduction in the field of healthcare: current situation and prospects. *Системи обробки інформації*, (1 (164)), 33-44.
19. Rghioui, A., Lloret, J., Harane, M., & Oumnad, A. (2020). A smart glucose monitoring system for diabetic patient. *Electronics*, 9(4), 678.
20. Zaabar, B., Cheikhrouhou, O., Jamil, F., Ammi, M., & Abid, M. (2021). HealthBlock: A secure blockchain-based healthcare data management system. *Computer Networks*, 200, 108500.
21. Khang, A., Hahanov, V., Litvinova, E., Chumachenko, S., Hajimahmud, A. V., Ali, R. N., ... & Anh, P. T. N. (2023). The Analytics of Hospitality of Hospitals in a Healthcare Ecosystem. In *Data-Centric AI Solutions and Emerging Technologies in the Healthcare Ecosystem* (pp. 39-61). CRC Press.

Received (Надійшла) 11.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.04.2024

Model of decentralized electric medical card exchange system based on blockchain technology

O. Shmatko, S. Salmikov

Abstract. Topicality. In today's digital age, data security is becoming a primary concern in various sectors, especially in healthcare. The critical nature of patient data requires robust protection mechanisms against unauthorized access and potential malicious use. This article examines the changing data security landscape in the healthcare sector and highlights vulnerabilities associated with traditional data storage systems. The paper proposes a model of a system for collecting, storing and exchanging electronic health records (EHR). The paper examines blockchain technology as a revolutionary approach to solving security problems for the exchange of confidential medical data. **The goal of this work** is to increase the confidentiality of medical data, its integrity and availability, as well as to ensure reliable exchange of this data between medical institutions and other participants by designing and developing software components for creating secure systems for transmitting medical information based on blockchain technology. **The object of research** includes systems for the transmission of medical information, which ensure the exchange of data between medical institutions, specialists and specialists, ensuring the confidentiality, integrity and availability of this data. **The subject of research** is methods and tools for designing and developing software components necessary for creating and maintaining secure medical information transmission systems. These components include software for encryption, authentication, authorization, and mechanisms for fault tolerance and data recovery. **Results.** In this paper, we propose a model of a decentralized system for collecting, storing, and exchanging EHR. **Conclusions.** The results of this study highlight the transformative potential of blockchain technology in rethinking data security paradigms in the healthcare sector. By creating a secure, transparent and efficient platform for managing EHR, the proposed model not only increases the confidentiality and integrity of medical data, but also makes a significant contribution to improving the quality of care and patient outcomes. As we move forward, the introduction of decentralized systems based on blockchain technology in healthcare represents a promising path to address complex challenges related to data security and Privacy, thereby paving the way for a more sustainable and patient-centered healthcare ecosystem.

Keywords: blockchain, electronic medical cards, smart contracts, Ethereum, MetaMask, architectural technology.

О. В. Юдін, М. Ю. Шипунов

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

МЕТОДИ ПРОТИДІЇ АВТОМАТИЗОВАНОМУ ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ З ВЕБСТОРОІНОК

Анотація. Робота присвячена аналізу методів протидії автоматизованому скануванню веб-вузлів. Метою роботи є аналіз алгоритмів та особливостей роботи парсингових систем та, на основі отриманих даних, побудова системи засобу, який буде спеціалізуватися саме на виявленні та протидії атак з використанням парсингових систем. Метою дослідження виступає аналіз методів протидії парсинговим системам. У роботі було розглянуто історію виникнення автоматизованих систем, їх класифікацію, особливості роботи та методи протидії. Запропоновані методи спеціалізуються на захисті від парсингових систем, та створює мінімальне додаткове навантаження на серверне обладнання, що не заважає роботі звичайним користувачам. Дані методи будуть корисними власникам великих ресурсів, на яких головним є саме інформація.

Ключові слова: парсингове програмне забезпечення, методи протидії ботам, парсери, crawler.

Вступ

Розвиток інформаційних технологій ставить все більш складні завдання стосовно обробки інформації, її зберігання, передавання та забезпечення захисту [1]. Одночасно з цими завданнями виникла можливість перекласти частину рутинних завдань на обчислювальну техніку. З плином часу потужності комп'ютерів зростали і розробники все частіше створювали програми для вирішення простих, тривіальних завдань. Пізніше такі програми отримали власну назву – боти. На сьогоднішній день, з розвитком якості глобальної мережі Інтернет кількість таких рутинних завдань лише збільшується. Наразі будь яка сфера так чи інакше взаємодіє з комп'ютерними системами. Наприклад на будь-якому складі встановлена система обліку об'єктів. У магазинах встановлені термінали оплати, які пов'язані з базою товарів. На великих підприємствах зазвичай працює поштовий сервер для ефективного обміну інформацією між співробітниками та керівництвом.

Для більш швидкого виконання цих завдань створюють різних ботів-помічників. Таким чином за для прискорення додавання нового товару на склад була створена система штрих-кодів, які скануються і автоматично додаються до потрібної категорії.

Наразі індустрія ботів активно розвивається. За останні роки зацікавленість до теми автоматизованих помічників лише зростає. За даними компанії IBM, станом на листопад 2023 року, 1,4 мільярди користувачів використовують ботів. У свою чергу компанії почали використовувати автоматизовані системи для організації технічної підтримки. Близько 85% питань від клієнтів наразі вирішують чат-боти [2].

Існує велика кількість ботів, як для комерційного використання, так і користувацькі. На сьогоднішній день, ChatGPT, головна розробка компанії OpenAI користується популярністю серед простих користувачів. Це зумовлено її здатністю вирішувати різноманітні завдання. Від пошуку і фільтрації інформації до генерації нового контенту (тексти, вірші або навіть коди програм). Але на жаль автоматизовані системи приносять не лише користь, а й додають нові проблеми людству. Згідно звіту компанії Imperva за 2023 рік, доля ботів у глобальній мережі складає

47,5% [3]. У свою чергу більше половини таких систем є шкідливими. Це призводить до генерації великої кількості додаткового трафіку, для маршрутизації якого необхідні додаткові потужності. Окрім цього, все більше з'являється судових позовів щодо авторських прав на контент, згенерований за допомогою штучного інтелекту (ШІ). Наприклад розробники соціальної мережі Instagram зобов'язались додати сповіщення користувачам про те, що поточний контент згенерований за допомогою нейронних мереж [4]. Окрім проблем, з якими людство вже зіштовхнулось існують і ті, які дадуть про себе знати у майбутньому.

Наприклад заміна працівників деяких сфер нейронною мережею в подальшому може призвести до появи нестандартних проблем, які система не здатна вирішувати. На сьогоднішній день, студенти та працівники ІТ сфери активно користуються ChatGPT для вирішення робочих завдань. В подальшому це може призвести до виявлення алгоритмічних закладок, про які ніхто не знає [5]. Окрім цього старі проекти перестануть підтримуватися, оскільки не залишиться спеціалістів, які починали створювати даний проект.

Однією з найважливіших проблем є використання ботів під час атак на веб-ресурси. Активний розвиток автоматизованих систем лише додає складностей, оскільки боти все ближче наближаються до вирішення тесту Т'юринга, що призводить до ускладнень їх виявлення. Власники інформаційних веб-ресурсів дізнаються про атаки, які були здійснені за допомогою парсингової систем (ПС), лише після того, як помічають наявність їх корпоративної інформації на сторонніх ресурсах у даркнеті [6].

Виходячи з цього, метою даної роботи є: аналіз алгоритмів та особливостей роботи ПС та, на основі отриманих даних, побудова системи засобу, який буде спеціалізуватися саме на виявленні та протидії атак з використанням ПС.

Терміни та визначення

Чат-боти – це комп'ютерні програми, які імітують людську мову (усну чи письмову) та дозволяють спілкуватися з цифровими пристроями так, якби вони були живими людьми. Чат-боти можуть бути дуже простими, як елементарні програми, що відповідають на простий запит однорядковою відповіддю, або

складними, як цифрові помічники, які навчаються та розвиваються в міру збору та обробки інформації, тим самим підвищуючи свій рівень персоналізації [7].

Парсери – це комп’ютерні програми для автоматизованого збору та систематизації інформації, розміщеної на різних сайтах.

Індексатор – це робот, який зазвичай використовується пошуковою системою для виявлення нових сторінок в інтернеті. Принцип роботи таких ботів полягає у постійному скануванні сторінок та виявленню на них посилань з подальшим переходом по них. Всю зібрану інформацію робот заносить до спеціальної бази даних, яка називається індексом. Дані про нові сторінки в інтернеті пошукова машина бере саме з такого індексу [8].

Генератори контенту – це автоматизовані системи, які мають на меті створення нової інформації ґрунтуючись, зазвичай, на текстовому запиті. Найчастіше такі боти у своїй основі мають нейромережу, що означає, що при кожній відправці одного і того ж самого запиту буде повертатися відповідь, яка відрізняється від попередньої. [9].

Пошукові – це автоматизовані системи, які створені з метою допомогти користувачам шукати необхідний фрагмент інформації у великій кількості даних. Зазвичай такі боти працюють разом з краулерами, що дозволяє отримувати актуальні дані щодо необхідного запиту користувача. [10].

Аналіз атак, спричинених ботами

На сьогоднішній день, основним показником розвитку комп’ютерних систем є ріст їх продуктивності. Нажаль, отримані потужності не завжди використовуються з добрими намірами. Зловмисники отримали потужний інструмент для швидкої реалізації експлойтів (metasploit) та повторювання операцій (спам-розсилки). У 2004 році був створений комп’ютерний хробак Vagle, який розповсюджувався за допомогою електронної пошти. Вкладення у письмі було файлом .EXE з іконкою програми Windows Calculator. При завантаженні вкладення на пристрій хробак відкривав програму калькулятора, а також потай від користувача копіював себе у директорію під назвою «bbeagle.exe» і створював певні ключі реєстру [11]. Після цього хробак завантажував бекдор, який забезпечував віддалений доступ до зараженого комп’ютера за портом 6777. Потім хробак шукав електронні адреси у файлах адресної книги Windows і продовжував поширюватися електронною поштою. Важливо зазначити, що ігнорувалися електронні адреси, які містили у назві рядок «.rl», «@windows», «@avp», «@hotmail.com» або «@msn.com» [12]. Створена ботнет мережа використовувалася зловмисниками для розсилки спам повідомлень та виконання DDoS атак.

У 2008 році 18-річний студент Оуен Уокер створив Akbot – вірус, головною метою якого було створення ботнет мережі. Під час зараження, пристрій додавався до серверів IRC та очікував вказівок. За час свого існування мережа складалася з 1,3 мільйонів пристроїв та використовувалася для реалізації DDoS атак [13]. На початку 2012 року фахівці ESET виявили ботнет мережу, яка отримала назву Win32/Georbot. За

даними компанії ESET, команди, що управляють, виходять з офіційного сайту уряду Грузії. Метою створення даного ботнета є викрадення документів та цифрових сертифікатів із заражених комп’ютерів. Ще одна особливість цієї шкідливої програми полягає у тому, що вона шукає на інфікованому пристрої файли конфігурації RDP (Remote Desktop Connection) з метою подальшого розкрадання та отримання несанкціонованого доступу до них [14]. Крім того, бот здатний створювати аудіо- та відео-записи та збирати інформацію про локальну мережу.

У 2012 році шість великих американських банків – Bank of America, JPMorgan Chase, US Bank, Citigroup, Wells Fargo та PNC Bank – стали жертвами DDoS-атаки, яка тривала кілька тижнів і заважала нормальному функціонуванню їхніх сайтів та онлайн-сервісів [15]. Атаку організували хакерська група, яка називає себе Izz ad-Din al-Qassam Cyber Fighters, яка заявила, що її мотивом був протест проти антимусульманського фільму «Невинність мусульман». Атака досягала потужності до 60 Гбіт/с. У 2016 році ботнет Mirai, який складався з мільйонів заражених пристроїв інтернету речей, таких як камери та маршрутизатори, провів кілька масштабних DDoS-атак на різні цілі [16]. Серед них були сайт фахівця з кібербезпеки Брайана Кребса, DNS-провайдер Дуп, який обслуговував багато популярних сайтів, таких як GitHub, HBO, Twitter, Reddit, PayPal, Netflix та Airbnb, а також французький хостинг-провайдер OVH. Потужність атак досягала від 623 Гбіт/с до 1.1 Тбіт/с. У 2017 році Google зазнала найпотужнішої DDoS-атаки в історії, яка досягла 2.54 Тбіт/с. Атака була частиною піврічної кампанії, яку вели урядові китайські хакери проти інфраструктури Google [17]. Однак Google змогла відбити атаку та забезпечити нормальну роботу своїх сервісів та безпеку даних користувачів. У 2018 році спеціалісти з Check Point викрили шкідливе програмне забезпечення, яке поширювалось серед Android пристроїв та об’єднувало їх у ботнет мережу. Спеціалісти зазначили, що на час знайдення, вже було заражено близько 5 мільйонів пристроїв [18]. У 2020 році у Гонконгу була зафіксована атака на системи відеоспостереження міста з використанням машинного зору. Таким чином зловмисники слідували за переміщенням поліцейських патрулів та інформували протестувальників про їх наближення [19]. У 2020 році, згідно даних компанії Positive Technologies, було виявлено глобальну кампанію, в якій зловмисники використовували веб-краулери для збору даних про мільйони користувачів соціальних мереж, таких як Facebook, Instagram, Twitter і YouTube. Ці дані були використані для фішингових атак, маніпуляції громадською думкою, шантажу тощо [20]. У 2021 році, згідно даних компанії Positive Technologies, була зафіксована глобальна атака на веб-сайти державних установ різних країн, у тому числі США, Німеччини, Франції та ін. впроваджували шкідливий код на ці сайти. Метою атаки було зараження відвідувачів сайтів та отримання доступу до їх пристроїв [21].

Компанія StormWall 4 серпня 2021 повідомила про виявлення DDoS-атак, організованих, за словами її фахівців, за допомогою «найпотужнішого ботнету за весь час існування інтернету». Таким чином,

максимальна потужність атаки сягала 2 Тбіт/с, що станом на 4 серпня було абсолютним рекордом серед усіх атак за участю ботнетів. Більшість DDoS-атак були спрямовані на ігрову індустрію. Ботнет складався з 49 тисяч пристроїв, серед яких знаходяться лише сервери, звичайні комп'ютери і мобільні пристрої відсутні. Атаки, які здійснювалися даним ботнетом, були стандартні, було запущено атаки протоколами UDP, TCP і HTTP з емуляцією браузера [22].

У 2022 році, згідно даних компанії Positive Technologies, було виявлено глобальну атаку на веб-сайти блокчейн-проектів, таких як криптовалютні біржі, гаманці, платформи і т.д [23]. Зловмисники використовували веб-краулери для збору інформації про користувачів, таких як адреси електронної пошти, паролі, номери телефонів тощо. Потім вони використовували цю інформацію для атак по ланцюжку, тобто для злому інших акаунтів і сервісів, пов'язаних з первинними жертвами. Метою атаки було крадіжка криптовалют та інших цифрових активів.

У 2022 році дослідники Fortinet FortiGuard Labs виявили шкідливу активність, яка була призведена ботнетом на основі Golang, який зламував сайти WordPress, щоб захопити контроль над цільовими системами [24]. Перша версія була здатна лише атакувати SSH порти потенційного Linux серверу. Оновлена версія мала додатковий функціонал для брутфорсу за допомогою telnet та через протокол тунелювання Generic Routing Encapsulation [25].

У квітні 2022 року фахівці ІБ-компанії Fortinet виявили ботнет на базі початкового коду Mirai, який отримав назву EnemyBot. EnemyBot – це небезпечний ботнет, який кіберзлочинці використовують у першу чергу для запуску DDoS-атак [26]. Даний ботнет був націлений на широкий спектр маршрутизаторів та пристроїв Інтернету речей (IoT), які використовували застаріле програмне забезпечення або примітивні облікові дані для входу.

Як видно з наведених прикладів, використання ботів ефективно для організації атак, які впливають на головні складові інформаційної безпеки – доступність, конфіденційність і цілісність.

Класифікація атак, спричинених ботами

На сьогоднішній день, існує велика кількість вузькоспеціалізованих шахрайських ботів, створених для конкретних завдань. Це призводить до складнощів під час створення конкретної класифікації цих систем. У представленій роботі буде розглянуто наступну класифікацію атак з використанням ботів:

- широкомасштабні;
- вузько спрямовані;
- гібридні;
- з використанням машинного зору;
- з використанням ботнет мереж.

Широкомасштабні атаки – головною метою даного виду атак є зараження якомога більшої кількості пристроїв. Зазвичай для виконання цієї атаки використовуються найпростіші боти, або навіть невеликі скрипти. Прикладом широкомасштабної атаки є спам розсилка. Під час розсилки спаму, головна задача зловмисника відправити заражений лист найбільшій

кількості користувачам. Завдяки цьому зловмисник збільшує шанси зустріти неосвіченого користувача, який відкриє вірусне посилання або файл.

Вузько спрямовані атаки – метою даної атаки є автоматична перевірка можливості використання певної вразливості. Таким чином, такі автоматизовані системи допомагають автоматизувати підготовку до глобальної атаки або протестувати виконання зараженого скрипту, створеного зловмисником на потенційно зараженому пристрої. Прикладом такого виду атак є експлуатація вразливостей в онлайн іграх, з метою отримання віртуальної валюти та/або цінних віртуальних предметів.

Атаки з використанням ботнет мереж – атаки даного типу базуються на виконанні однакового завдання на великій кількості пристроїв. Ботнет – це мережа комп'ютерів, заражена шкідливим програмним забезпеченням [27]. Зазвичай ботнет мережа організовується за допомогою поширення у мережі вірусного програмного забезпечення. Така мережа може складатися з різноманітних пристроїв (комп'ютери, телефони, побутові прилади, тощо). Найчастіше ботнет використовується для реалізації атаки типу DDoS для якої необхідно одночасно відправляти велику кількість запитів на один сервер [28]. З поширенням криптовалют ботнет мережі також почали використовуватися зловмисниками для майнінгу.

Атаки за допомогою машинного зору – метою даного виду атак є імітація роботи реального користувача. Зазвичай це використовується для збору інформації з веб-ресурсу або при необхідності подолати системи захисту, які базуються на тесті Т'юрингу. На сьогоднішній день, деякі «капчі» можна вирішити за допомогою ШІ. Таким чином був розроблений проект DeepCaptcha, який вирішує не лише прості капчі, де необхідно прочитати текст, а й графічні, які потребують вказати потрібні зображення.

Гібридні атаки – даний вид атаки комбінує розглянуті вище підходи для успішного проведення атаки зловмисником. Таким чином одні боти будуть збирати інформацію про жертву, інші тестувати зловмисні скрипти, а треті автоматизовано розгортати експлойти на пристрої жертви.

Розглянувши атаки спричинені ботами було виявлено, що на сьогоднішній день найчастіше зловмисники створюють власні ботнет мережі за допомогою вірусного програмного забезпечення. Після отримання достатньої кількості заражених пристроїв, подальші дії залежать від цілей зловмисника, але найчастіше виконуються саме атака типу DDoS.

У свою чергу технології парсингу постійно удосконалюються. Таким чином сучасні парсери білі «навчені» видавати себе за реального користувача, що значно ускладнює методи захисту від них.

Методи захисту від ботів

Методи захисту будь-якої системи ґрунтуються на прийнятій політиці безпеки, яка забезпечує необхідні властивості системи захисту [29]. Особливості ботів полягають у тому, що вони можуть бути дозволені або шкідливими. Як приклад дозволеного або корисного бота можна навести Googlebot, який автоматично

виявляє та сканує сайти, переходячи за посиланнями від сторінки до сторінки [30]. Однак при неправильному налаштуванні цього бота може сповільнюватися робота сервера, що викликає певний дискомфорт для користувача. На сьогоднішній день є лише один метод захисту від корисних ботів – використання загальноприйнятого серед розробників стандарту [31] виключень для ботів. Даний стандарт реалізовується через додавання файлу robots.txt до кореневого каталогу веб-ресурсу [32]. Головною проблемою цього стандарту є те, що його дотримання залежить лише від розробника бота. Це призводить до того, що лише невелика кількість корисних ботів дотримуються вимог стандарту.

Що стосується захисту веб-ресурсів від шкідливих ботів, зазвичай використовуються чорні списки, сигнатурне блокування, WAF та технологія Captcha.

Чорний список – це список IP-адрес та доменів, які були заблоковані через підозру в розсилці спаму. Спам – це небажані повідомлення у будь-якій формі, які надсилаються у великій кількості з використанням спеціальних ботів [33]. Найчастіше спам відправляється у формі комерційних електронних листів, надісланих на велику кількість адрес. Мета чорних списків – знизити відсоток надсилання небажаних розсилок користувачам [34]. Виділяють два типи чорних списків: на основі доменного імені відправника та на основі IP-адреси відправника.

Якщо домен або IP-адреса знаходиться в чорному списку, розсилки не будуть доставлені взагалі або пройдуть через додаткові спам-фільтри. Чорні списки використовують різні алгоритми ідентифікації спаму. На сьогоднішній день існує декілька відкритих чорних списків, а саме [35-37]:

- BRBL – безкоштовний чорний список IP-адрес, який створюється на основі заявок від користувачів;
- DNSBL – список IP-адрес та доменів, яких викрили в розсилці спаму;
- multiRBL – безкоштовний чорний список DNS, який посилається на інші чорні списки IPv4, IPv6 або домену;
- spamcop – список IP-адрес, які були відзначені користувачами як відправники спаму;
- spamhaus – список, який складається з декількох чорних списків DNS, у зв'язці з якими він відстежує та виявляє джерела небажаних розсилок, забезпечує захист від спаму;
- SURBL – списки сайтів, на які вели посилання в небажаних листах.

Сигнатурне виявлення шкідливих роботів – це спосіб виявлення і блокування роботів, який базується на аналізі їх характерних ознак, таких як шаблони HTTP-запитів, IP-адреси, заголовки, відбитки пристроїв [36]. Сигнатура бота – це його ідентифікатор, який дозволяє відрізнити його від легітимного трафіку. Сигнатурне виявлення шкідливих ботів може бути ефективним способом захисту від відомих і поширених ботів, але має свої недоліки.

Наприклад, сигнатурне виявлення шкідливих ботів неспроможна впоратися з новими чи невідомими ботами, які можуть змінювати свої сигнатури чи імітувати поведінку реальних користувачів. Також

сигнатурне виявлення шкідливих роботів може призводити до помилкових спрацьовувань, якщо сигнатури роботів збігаються з сигнатурами легітимних відвідувачів. Тому такий спосіб виявлення шкідливих ботів рекомендується використовувати у поєднанні з іншими методами. Прикладом сигнатури бота може бути особливі поля у HTTP заголовку або відкритий текст, який складається з основних параметрів системи (розробник, дата створення, дата останнього оновлення, тощо) або хеш сумою цих даних.

WAF (Web Application Firewall) – це мережевий екран для фільтрації трафіку, який працює на прикладному рівні та захищає веб-додатки методом аналізу трафіку HTTP/HTTPS та семантики XML/SOAP [39]. WAF може встановлюватися на фізичний або віртуальний сервер та виявляє найрізноманітніші види атак. За принципом роботи, WAF працює як проксі-сервер. WAF може працювати з кластеризацією та акселерацією програм [40]. WAF може вбудовуватися в мережу як система моніторингу або шлюзу. Працює WAF за наступними моделями безпеки[39]:

- забороняючий режим. Система працює за заданим списком, який забороняє прийом конкретної інформації, прописаної в налаштуваннях. Захищає веб-застосунки на прикладному рівні (аналог IPS) та вміє оцінювати потенційні загрози детальніше і частіше застосовується для забезпечення захисту від «популярних» і специфічних типів атак. Аналізує вразливість конкретних веб-застосунків;

- дозвільний режим. Протилежність забороняючому режиму, тобто дозволяє приймати конкретну інформацію, яка була заздалегідь вказана в налаштуваннях. Дозволяє отримати максимальний захист.

CAPTCHA – це реалізація тесту Т'юринга, яка має на меті визначення, ким є користувач системи: людиною чи комп'ютером. Перша версія реалізації була розроблена на початку XXI століття інженерами з Університету Карнегі Меллона, США. Команда під керівництвом Луїса фон Ана (Luis von Ahn) шукала спосіб фільтрації реєстрацій на сайтах, яка виконуються автоматичними програмами та спам-ботами [41]. Команда розробила систему, яка показує користувачеві сильно спотворений текст, який неможливо розпізнати програмними алгоритмами. Роботу з ресурсом можна було продовжувати тільки після того, як слово, яке відображається, було коректно введено в поле тексту.

Рішення вийшло настільки вдалим, що стало активно застосовуватися у всьому світі. Однак це швидко призвело до появи нового виду заробітку в інтернеті - вирішення задач CAPTCHA. Спамери почали платити людям за введення «контрольної фрази». Такий дохід став популярним у бідних країнах, де можливість отримати мінімальні гроші за тисячі рішень CAPTCHA є досить привабливою [42].

Метод протидії роботі парсерів

Виходячи з аналізу історії парсерів та існуючих методів захисту було виявлено, що на даний момент не існує спеціалізованого методу захисту веб-додатку від даного виду шкідливих ботів. З цього виходить, що є необхідність розробки власного засобу протидії ботам даного виду. Для цього необхідно

проаналізувати особливості роботи парсингових систем. Після цього розробити алгоритм роботи системи захисту та розробити засіб, який буде вбудовуватися в існуючі веб-ресурси. Головною частиною будь-яких парсингових систем є набір правил, згідно яких система збирає дані. У цих правилах зазвичай вказане посилання на сторінку, з якої необхідно отримати інформацію та «шляхи» до елементів HTML сторінки, у яких зберігається необхідна інформація (текст, посилання або зображення).

На сьогоднішній день існують різні протоколи запису «шляхів» до елементів, серед них виділяють: XQuery, CSSPath, RegEx та XPath [43]. Серед представлених методів, шкідливі парсери найчастіше використовують систему запису XPath. XPath — мова запитів до елементів документа XML. Ця мова розроблена для організації доступу до частин документа XML у файлах трансформації XSLT та є стандартом консорціуму W3C. XPath покликаний реалізувати навігацію по DOM у XML. У XPath використовується компактний синтаксис, відмінний від XML [44].

Кожна веб-сторінка обов'язково складається з структури у вигляді HTML документу та набору стилів, написаних на мові CSS. В процесі експлуатації та технічної підтримки розробники зазвичай не змінюють назви класів CSS та інші атрибути сторінки з метою стабільності роботи додатку. Цим і користуються зловмисники, які використовують парсингові системи для автоматизованого збирання даних. Так як атрибути HTML документів статичні, то і правила XPath не потребують оновлення кожного дня.

Виходячи з цього необхідно створити умови, коли створення правил не буде мати сенсу. У даній роботі представлена система протидії, яка автоматично генерує випадкові імена атрибутів сторінки під час кожного запиту. Це призводить до того, що будь-які статичні системи парсингу перестануть працювати, так як після перезавантаження сторінки існуючі правила вже не будуть працювати. Алгоритм роботи засобу представлений на рис. 1. Згідно ньому, при отриманні запиту GET від користувача, сервер запускає створення сторінки. Під час цього процесу система генерує випадкові назви для HTML-атрибутів. Після чого сторінка відправляється користувачу.

Висновки

Під час аналізу атак на комп'ютерні системи, для проведення яких використовувалися автоматизовані системи було виявлено, що у більшості випадків ботів використовують для проведення атаки типу DDoS. Для цього використовуються ботнет мережі. Для ефективного створення такої мережі, зловмисники створюють програмне забезпечення, яке заражає не лише домашні пристрої, а й елементи IoT. Це зумовлено тим, що виробники таких пристроїв доволі рідко створюють оновлення системи, що

призводить до появи великої кількості вразливостей. Також було виявлено, що атаки за допомогою краулерів майже неможливо виявити, оскільки їх важко відрізнити від справжніх користувачів. Тому всі випадки атак за допомогою таких систем ставали відомі лише завдяки появі вкраденої інформації на спеціалізованих ресурсах для продажу вкраденої інформації.

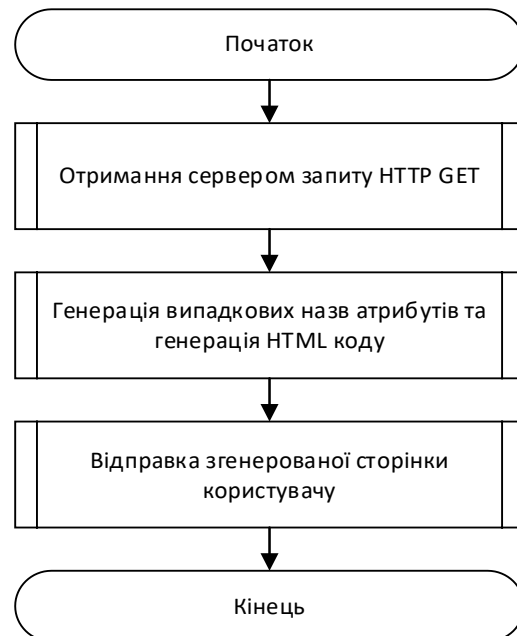


Рис. 1. Алгоритм роботи засобу протидії парсерам

Під час аналізу методів захисту від автоматизованих систем було виявлено, що на сьогоднішній день, основною проблемою під час розробки методів захисту є розмежування реальних користувачів від ботів. В залежності від складності алгоритму роботи бота, деякі системи захисту можуть бути або неефективними, або навіть заважати справжнім користувачам отримувати інформацію на ресурсі. У свою чергу, на сьогоднішній день відсутні засоби, які спеціалізуються саме на захисті від парсингових систем.

Запропоновані методи спеціалізуються на захисті від парсингових систем, та створює мінімальне додаткове навантаження на серверне обладнання, що не заважає роботі звичайним користувачам. Даний метод буде корисним власникам великих ресурсів, на яких головним є саме інформація.

Такими ресурсами можуть бути сайти новин, інтернет магазини або навіть сайти соціальних мереж. Це зумовлено тим, що за статистикою дані сайти найчастіше підвержені атакам зі сторони парсерів, а тому представлений метод зможе не лише ефективніше використовувати обчислювальну потужність серверів, а й вирішити проблеми авторських прав, коли один ресурс заробляє на інформації, розташованій на іншому.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Pevnev V., Frolov A., Tsuranov M., and Zemlyanko H. Ensuring data integrity in infocommunication systems. *International Journal of Computer Science*, 21(2), 2022. pp.228–233. doi.org/10.47839/ijc.21.2.2591;
2. Статистика ботів. Begibot. URL: <https://www.begindot.com/ua/>
3. Imperva Bad Bot Report. Imperva. URL – <https://www.imperva.com/resources/reports/2023-Imperva-Bad-Bot-Report.pdf>

4. A. Serkov, V. Tkachenko, V. Kharchenko, V. Pevnev, K. Trubchaninova, N. Doukas, "Method of increasing security of spatial intelligence in the industrial internet of things systems," Proceedings of the 24th Int. Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers, CSCC'2020, 2020, pp. 283–289. <https://doi.org/10.1109/CSCC49995.2020.00058>;
5. Serkov, A., Tkachenko, V., Kharchenko, V., Pevnev, V. Method to Enhance the Bandwidth and Noise Immunity of IIoT When Exposed to Natural and Intentional Electromagnetic Interference. 2020 IEEE Int. Conf. on Problems of Inf. Science and Technology (PIC S&T). Kharkiv, 2020. p.527–532. doi: <https://doi.org/10.1109/picst51311.2020.94679295>
6. Instagram тестує нові попередження. Unian. URL: <https://www.unian.net/techno/iskusstvennyy-intellekt-ne-proydet-instagram-testiruet-novye-preduprezhdeniya-12348897.html>
7. Чат-бот. Sendpulse. URL: <https://sendpulse.ua/ua/support/glossary/chatbot>
8. Що таке веб-краулер? Brightdata. URL: <https://ua-brightdata.com/blog/web-data-ru/what-is-a-web-crawler>
9. ALGOL. Ain. URL: <https://ain.ua/ua/2021/09/24/5-mertvix-jazikov-programmirovaniya/>
10. Пошуковий індекс. Roistat. URL: <http://surl.li/qrnqh>.
11. Чат-бот «Еліза» з 1960-х років пройшов тест Тюрінга краще, ніж ChatGPT. Technoverly. URL: <https://technoverly.com/chat-bot-eliza-iz-1960-h-godov-proshel-test-tyuringa-luchshe-chem-chatgpt/>
12. Beagle. DBpedia. URL – [https://dbpedia.org/page/Bagle_\(computer_worm\)](https://dbpedia.org/page/Bagle_(computer_worm))
13. Akbot. DataProtection. URL: <https://vms.dataprotection.com.ua/virus/?i=95482>
14. Виявлено ботнет Win32/Georbot, який використовує для оновлення сайт уряду Грузії. ESET. URL: <https://www.eset.com/ua-ru/about/newsroom/press-releases/malware/obnaruzhen-win32-georbot-napadenie-ru/>
15. Izz ad-Din al-Qassam Cyber Fighters. Radware. URL – <https://www.radware.com/security/ddos-knowledge-center/ddospedia/izz-ad-din-al-qassam-cyber-fighters/>
16. Ботнет Mirai. Enigmasoftware. URL: <https://www.enigmasoftware.com/ua/mirai-botnet-udaleniye/>
17. 8 найбільших DDoS-атак в історії. Timeweb. URL: <http://surl.li/qrnql>.
18. Securing Broncos Country. Checkpoint. URL – <https://www.checkpoint.com/security-in-action/>
19. Cybersecurity news from Hong Kong. Portswigger. URL – <https://portswigger.net/daily-swig/hong-kong>
20. Malicious attacks on the web and crawling of information data by Python technology. URL https://www.researchgate.net/publication/351772882_Malicious_attacks_on_the_web_and_crawling_of_information_data_by_Python_technology
21. Хакери знову напали на американські банки. Finance.Bigmir. URL: <https://finance.bigmir.net/news/2824135>
22. Protection from even the most severe DDoS attacks. Stormwall. URL – <https://stormwall.network/>
23. Актуальні кіберзагрози: IV квартал 2023 року. Fortiguard. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2022-q4/>
24. Anti-Botnet Services. Fortiguard. URL – <https://www.fortiguard.com/services/botnet>
25. EnemyBot. Enigmasoftware. <https://www.enigmasoftware.com/ua/enemybot-udaleniye/>
26. Що таке ботнет? ESET. URL: <https://www.eset.com/ua-ru/support/information/entsiklopediya-ugroz/zashchita-ot-botnetov/>
27. Розвиток ботнетів і DDoS-атак. IITD. URL: <https://iitd.com.ua/ua/news/rozvitok-botnetiv-i-ddos-atak/>
28. Crypto Mining Bot. Netacea. URL – <https://netacea.com/glossary/crypto-mining-bot/>
29. Pevnev V., Tsuranov M., Zemlianko H., Amelina O. Conceptual Model of Information Security, Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering, 2020, Vol. No 188, pp. 158–168. DOI: 10.1007/978-3-030-66717-7_14;
30. Загальні відомості про наші пошукові роботи та інструменти для збору даних. Google Developers. URL: <https://developers.google.com/search/docs/crawling-indexing/overview-google-crawlers?hl>
31. Uniform Resource Identifier. RFC. URL – <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3986>
32. Що таке robots.txt і навіщо взагалі потрібний індексний файл. Netpeak. URL: <https://netpeak.net/ua/blog/>
33. Як перевірити IP-адреси сервера та домену в спам-базі. Unisender. URL: <http://surl.li/qnrhr>.
34. Перевірка IP-адрес у спам-листах. Ukraine.com. URL: <https://www.ukraine.com.ua/info/tools/rbl>
35. Email Blacklist Перевірка. BRBL. URL: <https://ipcalc.co/rbl/>
36. What is a DNSBL? DNSBL. URL – <https://www.dnsbl.info/>
37. Spamhaus. Spamhaus Project. URL – <https://www.spamhaus.org>
38. Захист від ботів з PT Application Firewall. Slideshare. URL: <https://www.slideshare.net/VsevolodPetrov/pt-application-firewall>
39. WAF. ITglobal. URL: <https://itglobal.com/ru-ru/company/glossary/waf/>
40. Web Application Firewall. Omnilink. URL: <https://omnilink.ua/web-application-firewall/>
41. Що таке CAPTCHA? Google. URL: <https://support.google.com/a/answer/1217728?hl=ru>
42. BestCaptchaSolver. Bestcaptchasolver. URL: <https://bestcaptchasolver.com/>
43. Regular Expressions in XQuery: A Rephrased Perspective. CopyProgramming. URL – <https://copyprogramming.com/howto/xquery-regular-expressions>
44. Що таке XPath? Функції та синтаксис. HighLoad. URL: <https://highload.today/xpath-xml>

Received (Надійшла) 13.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.04.2024

Methods of preventing automated collection of information from web pages

O. Yudin, M. Shypunov

Abstract. The work is devoted to the analysis of methods of counteracting the automated scanning of web sites. The purpose of the work is to analyze the algorithms and features of parsing systems and, based on the data obtained, to build a tool system that will specialize in detecting and countering attacks using parsing systems. The research method is the analysis of methods of countering parsing systems. The paper considered the history of the emergence of automated systems, their classification, features of work and methods of countermeasures. The proposed methods specialize in protection against parsing systems, and create a minimal additional load on server equipment, which does not interfere with the work of ordinary users. These methods will be useful to the owners of large resources, on which information is the main thing.

Keywords: parsing software, anti-bot methods, parsers, crawlers.

О. Ю. Кузьменко, В. С. Кузьменко

Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна

ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ НА МОРЬСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ

Анотація. Шкідливі виробничі фактори значно впливають на продуктивність праці та можуть призвести до неправних наслідків. В статті розкрито особливості охорони праці на морському транспорті, а також визначено доцільність їх застосування в специфічних умовах. Вказано на роль та місце національного законодавства щодо регулювання охорони праці на морському транспорті. Досліджено особливості міжнародних норм щодо застосовуються в процесі регулювання охорони праці на суднах. Доведено необхідність наявності на судні капітана із відповідними кваліфікаційними навиками, його роль і місце в системі охорони праці, забезпечення безпеки персоналу та збереження майна, а також виконання інших, визначеного законодавством та правилами внутрішнього трудового розпорядку діяльності. Узагальнено отримані результати стосовно специфіки організації охорони праці та її особливостей, що залежать від внутрішньо організаційних, зовнішніх факторів та природно-кліматичних умов. Обґрунтовано необхідність вдосконалення правового регулювання охорони праці на морському транспорті з метою підвищення трудової здатності та захисту прав і законних інтересів працівників.

Ключові слова: охорона праці, нещасний випадок, морське право, водний транспорт, екіпаж судна.

Вступ

Постановка проблеми. Робота на морському транспорті є досить специфічним видом праці. Виклики, пов'язані із цим видом діяльності мають не лише виробничий характер, але й визначаються природно-кліматичними умовами, зовнішніми загрозами та ризиками. Цей специфічний вид діяльності не може бути обмежений лише правовими нормативами, як це відбувається в рамках специфіки діяльності на вітчизняних підприємствах та в організаціях різних форм власності. Специфіка охорони праці на суднах має певні особливості і потребує детального опрацювання.

Проблематика дослідження охорони праці на морському транспорті визначається в першу чергу складністю нормативно-правової бази, яка регулює цей вид діяльності, характером праці, умовами роботи на воді, безпекою судноплавства та специфікою самих водних засобів. Загалом правові норми, які регулюють особливості охорони праці характеризуються сукупністю правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних, лікувально-профілактичних засобів та заходів, що спрямовуються на збереження життя, здоров'я та працездатності людини в процесі трудової діяльності.

Зважаючи на те, що працівник водного транспорту в процесі здійснення своєї трудової діяльності знаходиться безпосередньо під впливом природних, виробничих та соціально-психологічних умов, цілком важливо створити для нього безпечне і здорове середовище, з мінімізацією негативного впливу виробництва на його життя та здоров'я, забезпечивши при цьому нормальне функціонування виробничого процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням особливостей охорони праці на морському транспорті займалася низка вітчизняних науковців. Стрельцова Є. Д. [11] визначає особливості

регулювання трудових відносин у торгівельному мореплаванні. Дослідниця аналізує роль та місце трудових відносин в системі охорони праці в торгівельному мореплаванні. Ківалов С. В. [3] визначає доцільність ратифікації головного міжнародного документу – Конвенції 2006 [6], її роль та місце в міжнародному судноплаванні. Дослідник робить аналіз щодо доцільності впровадження вказаного міжнародного нормативно-правового акту у вітчизняне законодавство. Іванова А. В. [1] на основі власних досліджень визначає особливості правового аналізу Конвенції про працю у морському судноплаванні.

На основі наведених аргументів автор робить висновок стосовно подальшого розвитку мореплавства в Україні та в світі.

Окрім праць науковців у дослідженні зроблено огляд вітчизняного законодавства, наведено доцільність застосування нормативно-правових актів, які регулюють особливості охорони праці. В тому числі й охорону праці на морському транспорті.

Мета статті полягає у розкритті особливостей охорони праці на морському транспорті та шляхів його удосконалення.

Виклад основного матеріалу

Конституція України [2] визначає основи соціальних та трудових прав громадян, забезпечуючи їм право на безпечну працю, відпочинок, матеріальне забезпечення у випадку втрати працездатності, а також право на охорону здоров'я, медичну допомогу та медичне страхування. Законодавство, відповідно до Конституції України, зобов'язує кожного громадянина сумлінно працювати та дотримуватися трудової дисципліни.

Ці принципи і стандарти стосуються також моряків, які працюють на морському транспорті. Держава зобов'язана організувати та регулювати трудові відносини на морському транспорті шляхом прийняття

нормативно-правових актів та забезпечення єдиної державної політики в галузі охорони праці працівників, які пов'язані трудовими відносинами у сфері мореплавства. Держава несе відповідальність перед моряками за забезпечення їхніх прав і збереження безпечних умов праці на морському транспорті.

В Україні правове регулювання охорони праці здійснюється відповідно до Закону України «Про охорону праці» [10]. Відповідно до ст. 1 Закону – охорона праці визначається як система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних засобів та заходів, що спрямовані на збереження життя, здоров'я та підтримку працездатності людини в процесі трудової діяльності. Оскільки охорона праці виникає в процесі трудової діяльності, головними суб'єктами цих відносин є роботодавець та працівник. Частина 2 Закону вказує, що його норми поширюються на всіх юридичних та фізичних осіб, які використовують найману працю.

Закон України «Про охорону праці» є загальним законодавчим актом, який встановлює загальні принципи та вимоги щодо забезпечення безпеки та здоров'я працівників у всіх галузях економіки, включаючи морський транспорт [10]. Принципи та норми, встановлені цим законом, є обов'язковими для дотримання всіма суб'єктами господарювання, що займаються морськими перевезеннями. Охорона праці на морському транспорті включає в себе специфічні вимоги та положення, які враховують особливості робочих умов та професійної діяльності моряків. Ці вимоги можуть встановлюватися окремими нормативно-правовими актами, які регулюють діяльність морських компаній, портових установ та інших суб'єктів морського транспорту.

Правові відносини на морському транспорті носять трудовий характер, оскільки в цього випадку використовується праця найманих працівників. Зважаючи на це, відповідно до законодавства України, трудові умови не можуть містити дискримінаційних норм та положень, які суперечать законам та іншим нормативно-правовим актам у сфері охорони праці. (ст. 5 Закону) [10].

Праця на морі значно відрізняється від повсякденної праці на підприємстві чи в організації. Водна стихія це не передбачуване і приховане джерело небезпеки, а отже і захист працівників у цій сфері має бути забезпечений на найвищому рівні. Перш ніж досліджувати особливості охорони праці варто проаналізувати ризики, які можуть виникати на судах. Охорона праці на судні передбачає створення таких умов, які б уникали впливу шкідливих факторів на працівників під час їх робочого часу на судні, в тому числі в період вахти та відпочинку. До шкідливих факторів варто віднести ті процеси, які негативно позначаються на здоров'ї працівників, і можуть призвести до захворювання чи травматизму.

У вітчизняному законодавстві прийнято ще один нормативно-правовий акт, яким регулюються відносини, пов'язані з торгівельним мореплавством – Кодекс торговельного мореплавства України. Вказаний нормативно-правовий акт регулює відносини

пов'язані із реалізацією державної програми у сфері морського та внутрішнього водного транспорту, а також інших важливих питань.

Як слушно зауважує Є. Д. Стрельцов, турботу про безпеку моряків закріплено й у низці міжнародних «морських» документів загального характеру, головним серед яких є Конвенція ООН про морське право 1982 року [7], Конвенція про охорону людського життя на морі 1974 р. [8]; Конвенція про міжнародні правила попередження зіткнення суден у морі 1972 р. [9]; Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 р. [5] та ін. Варто наголосити на тому, що права моряків, їх захист та безпека є невід'ємною частиною їх діяльності, що значною мірою залежить не лише від особистих якостей особи, але й від зовнішніх загроз та викликів. Факторами фізичного, соціального та психологічного благополуччя персоналу, яке працює на морському транспорті є належне забезпечення трудових умов [11, с. 355].

Необхідно відзначити, що важливість обговорення умов праці моряків набуває неабиякого значення через так званий «людський фактор» - аспект, пов'язаний з виникненням людських помилок або недбалості, які часто стають головною причиною різних аварій та інцидентів на морі.

Як і будь-яка інша діяльність, діяльність пов'язана із виконанням праці на морському транспорті має регулюватися відповідно до вимог, встановлених вітчизняним та міжнародним законодавством. Працівники, задіяні до виконання трудової діяльності на морському транспорті повинні бути захищені не лише в юридичному, а також і у фізичному сенсі. Усвідомлюючи ризики, які виникають на судах, міжнародне морське співтовариство особливо ретельно стежить за тим, чи не зазнає порушень праця моряків в процесі перебування її на морському транспорті і здійснення безпосередньої трудової діяльності. Зважаючи на це, постійно відбувається перегляд діючих міжнародних конвенцій та трудових стандартів, прийняття нових відповідних документів, рекомендацій стосовно їхньої імплементації, контролю та дотримання. Це є надзвичайно важливим процесом, оскільки впливає на характер та зміст праці, ефективності виконання роботи на морському транспорті, захист життя та здоров'я працівників, зайнятих на морі.

Досліджуючи питання специфіки охорони праці на морському транспорті, варто згадати Конвенцію про працю в морському судноплавстві від 2006 року, що вступила в дію 2013 року. Основна мета прийняття Конвенції 2006 спрямована на захист трудових прав моряків. Вказаний нормативний акт зміг систематизувати нормативно-правові акти, які існували до прийняття Конвенції - 2006. Станом на 2024 рік до Коонвенції приєдналося понад 80 держав-членів МОП [6].

Конвенція 2006 року містить положення про основні принципи та зобов'язання держав учасниць, а також правила, якими визначені права й обов'язки різних сторін у трудових та пов'язаних із ними відносинах, зокрема правил, стандартів, керівних принципів

стосовно мінімальних вимог у різних сферах, таких як праця моряків, умови зайнятості, відпочинку, харчування, охорони здоров'я, медичного обслуговування, соціально-побутового обслуговування та соціального забезпечення.

Як слушно зазначає С. В. Ківалов, Конвенція-2006 є обов'язковим міжнародно-правовим актом для багатьох держав світу, закріпивши вироблені багаторічними процесами правила регулювання праці моряків за кордоном в умовах вільного глобального ринку. Це важливий крок, що сприяє об'єднанню різних нормативно-правових актів, якими регулюється організація праці моряків в одному нормативному акті [3, с. 9-10]. С. 9-10

Як зазначає А. В. Іванов, ратифікація Конвенція – 2006 відкриє перед Україною шлях до розвитку міжнародних відносин у сфері мореплавства. Олднак, ратифікувавши цей значної ваги документ потягнен за собою розробку всього комплексу правових, організаційних, економічних та інспекційних механізмів, які забезпечать дотримання викладених вимог [1, с. 27]. С

Роль капітана судна у сфері забезпечення охорони праці надзвичайно велика. Глава 2 Кодексу торговельного мореплавства України визначає, що капітан судна визнається представником судновласника і вантажовласника.

Це означає, що капітан судна наділений повноваженнями проводити інструктажі, надавати роз'яснення, вживати всіх необхідних заходів щодо запобігання будь-якої шкоди, в тому числі і людям, які знаходяться на судні.

У випадку завдання шкоди персоналу, капітан повинен вжити всіх необхідних заходів для письмового оформлення цих випадків у порядку, передбаченому законодавством України і низкою міжнародних договорів та угод.

Відповідно до ст. 62 Кодексу торговельного мореплавства, у випадку воєнної небезпеки, піратських дій капітан судна зобов'язаний вжити всіх необхідних заходів щодо рятування людей, які перебувають на судні, з метою недопущення захоплення судна, документів, вантажу та іншого майна, яке знаходиться на судні [4].

Окрім вищезазначеного, до обов'язків капітана входить забезпечення порядку на судні, видача розпоряджень, застосування заохочень, накладення дисциплінарних стягнень та низку інших необхідних дій. Загалом, законодавство України наділяє капітана обов'язками роботодавця, покладаючи на нього відповідальність за підтримку правового порядку на судні, в тому числі й щодо забезпечення охорони праці персоналу.

Забезпечення охорони праці на морському транспорті здійснюється на основі нормативної документації з охорони праці, до якої відносять: державні нормативні акти про охорону праці — міжгалузеві та галузеві, система стандартів безпеки праці — Держстандарти України (ДСТУ), міждержавні стандарти безпеки праці (ДСТ ССБП) і міждержавні міжгалузеві та галузеві нормативні акти. Нормативно-технічна документація містить норми з охорони праці, інструкції та

стандарты, розроблені відповідно до специфіки їх діяльності. Окремо варто наголосити про міжгалузеві норми, які регулюють специфічний вид діяльності. Так, на морському транспорті галузевими (спеціальними) правилами є затверджені Міністерством транспорту і профспілкою моряків правила з техніки безпеки на судах морського флоту. На основі галузевих правил та норм розробляються інструкції з визначенням конкретних заходів безпеки щодо проведення робіт та встановлення правил пожежного захисту. Такі правила та інструкції повинні переглядатися з метою удосконалення та їх ефективного застосування.

Найпоширенішими правилами на морському транспорті є Правила внутрішнього трудового розпорядку, контроль за дотриманням яких покладається на капітана.

Трудовий розпорядок на морському транспорті визначається відповідно до правил внутрішнього трудового розпорядку, а на морському флоті Статутом служби на судах і Статутом про дисципліну працівників морського транспорту. Ці правила і зазначені статуту обов'язковими для виконання всіма працівниками морського транспорту.

В процесі виробничої діяльності можуть виникати конфлікти між працівниками та вищим керівництвом стосовно застосування законодавства про працю, в тому числі питань, пов'язаних з переведенням на іншу роботу, оплати понаднормових робіт, звільнення тощо.

Трудові суперечки на морських підприємствах, зокрема на судах, розглядаються спеціальними комісіями з трудових спорів. На морському підприємстві може бути створена комісія з питань охорони праці з метою забезпечення участі працівників у прийнятті рішень щодо безпеки, гігієни праці та захисту виробничого середовища. До цієї комісії можуть входити представники роботодавця, профспілки, а також уповноважених працівників та фахівців з безпеки і гігієни праці. Типове положення про таку комісію затверджується спеціально уповноваженим центральним органом виконавчої влади з нагляду за охороною праці.

Однією з форм організації охорони праці на підприємстві є планування, що включає в себе розробку та реалізацію перспективних і оперативних планів поліпшення умов праці, техніки безпеки і санітарно-оздоровчих засобів.

Варто відзначити, що щорічний нагляд за охороною праці на судні здійснюється спеціальною комісією, в яку входять представники служб охорони праці, безпеки мореплавства, судового господарства та інших відділів, за участю представника комітету профспілки плавскладу.

Результати перевірки фіксуються в карті безпеки праці на судні. На основі звіту про виявлені недоліки представник служби охорони праці видає розпорядження про їх усунення.

Висновки

Встановлено, що вітчизняне законодавство містить норми щодо охорони праці, в тому числі й на морському транспорті.

В основі регулювання норм охорони праці міститься Конституція України, Закон України «Про охорону праці», Кодекс торговельного мореплавства України, стандарти, норми, правила, якими регулюються міжгалузеві норми охорони праці на морському транспорті.

Окремо варто наголосити на міжнародних нормативно-правових актах, якими регулюється специфіка праці на морському транспорті.

Констатовано, що станом на 2024 рік Україна так і не спромоглася ратифікувати Конвенцію 2006, якою здійснюється регулювання організації праці моряків по всьому світу.

І хоча на даному етапі в Україні триває повномасштабна війна, а морські порти працюють під постійними обстрілами і загрозами з повітря, все ж таки перегляд і удосконалення законодавства щодо врегулювання діяльності на воді, має важливе значення.

Удосконалення норм охорони праці на морському транспорті є невід'ємною частиною забезпечення безпеки та здоров'я моряків під час їхньої професійної діяльності.

Враховуючи специфіку роботи на судах та потенційні ризики, пов'язані з морськими перевезеннями, постійне удосконалення норм охорони праці є важливим завданням. Визначено, що на морських підприємствах, включаючи судна, здійснюється регулярний контроль за дотриманням норм охорони праці.

Це забезпечується за допомогою спеціальних комісій, до складу яких входять представники служб охорони праці, безпеки мореплавства, а також інших відділів і служб підприємства. Крім того, у процесі контролю бере участь представник комітету профспілки плавскладу.

В подальшому, доцільність удосконалення норм охорони праці на морському транспорті продовжуватиме формуватися і удосконалюватися шляхом поглиблення забезпечення безпеки працівників, у відповідності до міжнародних стандартів, підвищення ефективності роботи. Використання сучасних технологій, включаючи штучний інтелект, сприятиме покращенню процесів охорони праці та зниженню ризиків для моряків.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Іванова, А.В. (2010). Правовий аналіз Конвенції про працю у морському судноплаванні 2006 року та національного законодавства з питань працевлаштування моряків. *Митна справа, спеціальний випуск*, 26-31.
2. Конституція України від 28. 06.1996 № 30 ст. 141. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80#Text>
3. Ківалов С. В. (2019). Конвенція МОП 2006 року про працю в морському судноплаванні: шлях до ратифікації. *LEX PORTUS* № 4 (18). https://lexportus.net.ua/vipusk-4-2019/kivalov_s_v_konventsiiia_mop_2006_roku_pro_pratsiu_v_morskomu_sudnoplavstvi_shliakh_do_ratyfikatsii.pdf
4. Кодекс торговельного мореплавства України від 23.05.1995 №176/95-ВР. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/176/95-%D0%B2%D1%80#Text>
5. Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти від 07.07.1978. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_053#Text
6. Про працю у морському судноплаванні; Конвенція Міжнародної організації праці від 23.02.2006 р. http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/993_519
7. Про морське право: Конвенція ООН від 10.12.1982 . <https://ips.ligazakon.net/document/MU82K23R>
8. Про охорону людського життя на морі: Конвенція від 01.11.1974. <https://marad.gov.ua/ua/npa/mizhnarodna-konvenciya-pro-ohoronu-lyudskogo-zhittya-na-mori-1974-roku-solas-74>
9. Про міжнародні правила попередження зіткнення суден у морі: Конвенція від 20.10.1972. <https://marad.gov.ua/ua/npa/konvenciya-pro-mizhnarodni-pravila-poperedzhennya-zitknennya-suden-u-mori-1972-roku>
10. Про охорону праці: Закон України від 14.10.1992 №2694-ХІІ <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>
11. Стрельцова Є. Д. До питання про міжнародну уніфікацію трудових стандартів у торговельному мореплаванні. *Безпека людини в умовах глобалізації: сучасні правові парадигми: матеріали 7-ї Міжнародної науково-практичної конференції* (м. Київ, Національний авіаційний університет, 24 лютого 2017 р.). Том 1. Тернопіль: Вектор, 2017. С. 355-357.

Received (Надійшла) 11.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.04.2024

Fundamentals of labor protection in marine transport

Olena Kuzmenko, Valentyn Kuzmenko

Abstract. Harmful production factors significantly affect labor productivity and can lead to irreparable consequences. The article reveals the peculiarities of labor protection on sea transport, and also determines the expediency of their application in specific conditions. The role and place of national legislation on the regulation of labor protection in maritime transport is indicated. Peculiarities of international norms applied in the process of regulating labor protection on ships have been studied. The necessity of having a captain with relevant qualification skills on the ship, his role and place in the labor protection system, ensuring the safety of personnel and property preservation, as well as the implementation of other activities determined by legislation and rules of internal labor regulations, have been proven. The obtained results regarding the specifics of the labor protection organization and its features, which depend on internal organizational, external factors and natural and climatic conditions, are summarized. The need to improve the legal regulation of labor protection on sea transport in order to increase work capacity and protect the rights and legitimate interests of workers is substantiated.

Keywords: labor protection, accident, maritime law, water transport, ship's crew.

А. В. Столітній

Національний юридичний університет імені Ярослава Мудрого, Харків, Україна

ВПРОВАДЖЕННЯ Е-СИСТЕМИ ПІД ЧАС НАГЛЯДУ ЗА ДОДЕРЖАННЯМ ЗАКОНІВ ПРИ УМОВНО-ДОСТРОКОВОМУ ЗВІЛЬНЕННІ ЗАСУДЖЕНИХ ВІД ПОКАРАННЯ АБО ЙОГО ЗАМІНИ НА БІЛЬШ М'ЯКЕ

Анотація. Актуальність даного дослідження обумовлена складністю розрахунків строків умовно-дострокового звільнення від відбування покарання і заміни невідбутої частини покарання більш м'яким. Зазначено, що потенційні корупційні фактори обумовлюють ризики помилкового або свідомо неправильного розрахунку працівниками виправних установ відбутого засудженим строку покарання, що може призвести до несвоєчасного умовно-дострокового звільнення від відбування покарання засудженого або заміни покарання більш м'яким. Вказано, що сучасний ступінь розвитку інформаційних технологій надає можливість автоматизувати самоповторювані математичні та логічні операції, що застосовне, в тому числі, до нагляду прокурора за додержанням законів при виконанні судових рішень у кримінальних справах. Наголошується, що створення спеціалізованих автоматизованих електронних алгоритмів на основі норм Закону України "Про прокуратуру" та з урахуванням практичних напрацювань надає органам прокуратури ефективний та неупереджений інструмент правозастосування. Описано функціонал та принципи роботи розробленої авторами комп'ютерної програми «Автоматичне обчислення строку відбутого засудженим покарання» (Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір від 12.05.2021 № 104528), що забезпечує автоматичне обчислення строку застосування до засуджених ст.ст. 81, 82, 107 КК України. Зроблено висновок, що в умовах триваючих процесів цифровізації кримінальної юстиції та з урахуванням необхідності оптимального використання органами прокуратури людських та часових ресурсів, доцільне системне впровадження розробленої комп'ютерної програми як ефективного та неупередженого інструменту правозастосування щодо автоматичного обчислення строку застосування до засуджених ст.ст. 81, 82, 107 КК України під час проведення прокурорами відповідних перевірок в порядку ст. 26 Закону України "Про прокуратуру".

Ключові слова: прокурор, нагляд, покарання, умовно-дострокове звільнення, заміна, строк, обчислення, автоматизація.

Вступ

Відповідно до п. 4 ч. 1 ст. 2 Закону України "Про прокуратуру" від 14.10.2014 № 1697-VII (далі – ЗУ "Про прокуратуру") на прокуратуру покладено функцію нагляду за додержанням законів при виконанні судових рішень у кримінальних справах, а також при застосуванні інших заходів примусового характеру, пов'язаних з обмеженням особистої свободи громадян [1]. Для реалізації вказаної функції статтею 26 ЗУ "Про прокуратуру" прокурору надано повноваження щодо відвідування місць несвободи, опитування осіб, ознайомлення з матеріалами, проведення перевірок, життєвих заходів реагування тощо.

Наказом Генерального прокурора від 29.12.2021 № 400 "Про організацію діяльності прокурорів з протидії порушенням прав людини у правоохоронній та пенітенціарній сферах" (далі – Наказ № 400) передбачено вимоги щодо забезпечення прокурорами нагляду за додержанням:

- прав і свобод людини, загальних інтересів суспільства і держави при виконанні покарань та інших заходів примусового характеру, пов'язаних з обмеженням особистої свободи, відповідно до законів України, міжнародних договорів, згода на обов'язковість яких надана Верховною Радою України;

- законодавства щодо запобігання катуванню чи нелюдському або такому, що принижує гідність, поводженню із затриманими, взятими під варту та засудженими чи їх покаранню;

- передбачених законодавством вимог режиму, порядку та умов тримання затриманих, осіб, до яких застосовано запобіжні заходи у вигляді тримання під

варту, поміщення до психіатричного закладу в умовах, що виключають їхню небезпечну поведінку, а також осіб, до яких застосовано інші заходи примусового характеру;

- визначених законодавством вимог режиму, порядку та умов тримання, а також відбування покарань в'язнями, у тому числі щодо використання бюджетних коштів, майна та інших ресурсів держави, спрямованих на ці цілі;

- законодавства під час виконання покарань, не пов'язаних з позбавленням волі, та пробації;

- законів під час здійснення оперативно-розшукової діяльності оперативними підрозділами органів і установ виконання покарань та слідчих ізоляторів Державної кримінально-виконавчої служби України;

- законодавства при застосуванні за адміністративні правопорушення заходів примусового характеру, пов'язаних з обмеженням особистої свободи громадян [2].

На виконання вказаних норм органами прокуратури під час здійснення нагляду за додержанням законів при виконанні судових рішень у кримінальних справах, а також при застосуванні інших заходів примусового характеру, пов'язаних з обмеженням особистої свободи громадян, вживаються заходи щодо виявлення, усунення порушень прав засуджених та їх недопущення у подальшому.

Окремим питанням під час виконання прокурами завдань на цьому напрямі є забезпечення нагляду за дотриманням прав засуджених до позбавлення волі при застосуванні умовно-дострокового звільнення від відбування покарання і заміни невідбутої частини покарання більш м'яким, передбачених ст.ст. 81, 82, 107

Кримінального кодексу України (далі – КК України) відповідно, з метою недопущення порушень з цих питань. При цьому п. 15.2 Наказу № 400 окремо передбачає проведення прокурорами, у межах компетенції, перевірок в комісіях установ виконання покарань з розгляду питань застосування до засуджених ст.ст. 81, 82, 84 КК України [3].

Варто зауважити, що умовно-дostroкове звільнення від відбування покарання (ст.ст. 81, 107 КК України) та заміна невідбутої частини покарання більш м'яким (ст. 82 КК України) є комплексними інститутами кримінального та кримінально-виконавчого права, що системно впливають на кримінальну юстицію.

Зокрема, Рекомендація Rec (2003) 22 Комітету міністрів Ради Європи державам-членам “Про умовно-дostroкове звільнення” визначає умовно-дostroкове звільнення одним з найбільш ефективних і конструктивних засобів запобігання рецидивам і сприянню переселенню, забезпечуючи заплановану, полегшену і контрольовану реінтеграцію ув'язненого в суспільство [4].

Соціальним призначенням інституту звільнення від покарання є корегування інтенсивності криміналізації конкретних суспільно небезпечних діянь, скоєних конкретними особами, в залежності від досягнення по відношенню до них цілей покарання – перш за все виправлення засуджених, сприяти індивідуалізації та диференціації кримінальної відповідальності, служити поступовою формою переходу від застосування кримінальних покарань до нормального життя у суспільстві [5, с. 18]. Вказане застосовне також щодо заміни невідбутої частини покарання більш м'яким.

З огляду на вимоги ч. 1 ст. 2 Кримінального процесуального кодексу України щодо застосування до кожного учасника кримінального провадження належної правової процедури [6], визначену ч. 1 ст. 1 Кримінально-виконавчого кодексу України мету покарання через призму виправлення і ресоціалізації засуджених [7], нагляд прокурора за додержанням законів при умовно-дostroковому звільненні засуджених від покарання або його заміни на більш м'яке набуває особливої актуальності.

Огляд літератури

Українські науковці присвятили дисертаційні дослідження питанням прокурорського нагляду за додержанням законів в установах виконання покарань (Лемак Р.В. (2012) [8]), прокурорського нагляду за додержанням прав та законних інтересів засуджених до позбавлення волі (Курило М.П. (1998) [9]) та безпосередньо прокурорському нагляду за додержанням законів України при умовно-дostroковому звільненні засуджених від кримінального покарання (Скригонюк М.І. (1999) [10]). Питання обчислення строків при застосуванні до засуджених умовно-дostroкового звільнення від відбування покарання висвітлював у науковій публікації Настасяк О. (2016) [11]. Водночас, питання автоматизації прокурором окремих процедур з нагляду за додержанням законів при виконанні судових рішень у кримінальних справах щодо застосування умовно-дostroкового

звільнення від відбування покарання і заміни невідбутої частини покарання більш м'яким вченими не досліджувалось а, з огляду на потенціал сучасних інформаційних у наведеному напрямі, є актуальним та потребує дослідження.

Метою даної роботи є обґрунтування перспективи вдосконалення процедур нагляду за додержанням законів при виконанні судових рішень у кримінальних справах шляхом застосування прокурором автоматизованих електронних алгоритмів при обчисленні строків застосування умовно-дostroкового звільнення від відбування покарання і заміни невідбутої частини покарання більш м'яким, передбачених ст.ст. 81, 82, 107 КК України.

Результати та обговорення

Умовно-дostroкове звільнення від відбування покарання (ст.ст. 81, 107 КК України) та заміна невідбутої частини покарання більш м'яким (ст. 82 КК України) полягають у дostroковому звільненні від відбування покарання або його заміни на більш м'яке засудженому, який відбув певну частину строку покарання, призначеного вироком суду, та довів своє виправлення або став на шлях виправлення, за умови обов'язкового дотримання ним ряду обов'язків, перелічених у законі та встановлених судом.

Застосування ст.ст. 81, 82, 107 КК України можливе лише за наявності матеріальної підстави та формальної передумови. Матеріальною підставою для застосування ст.ст. 81, 107 КК України є доведеність засудженим свого виправлення сумлінною поведінкою і ставленням до праці (та навчання – для неповнолітніх), для застосування ст. 82 КК України – становлення на шлях виправлення. Формальною передумовою застосування вказаних норм є фактичне відбуття засудженим частини строку покарання, визначеної у ч. 3 ст. 81, ч. 4 ст. 82 та ч. 3 ст. 107 КК України.

Конкретні строки, що потребують розрахунку для можливого застосування ст.ст. 81, 82, 107 КК України, визначено залежно від виду та ступеня тяжкості кримінального правопорушення і особи застудженого, а саме для застосування:

– ст. 81 КК України – засуджений повинен відбути не менше половини (кримінальний проступок або нетяжкий злочин, крім корупційних кримінальних правопорушень, а також за необережний тяжкий злочин), двох третин (корупційний нетяжкий злочин, умисний тяжкий злочин чи необережний особливо тяжкий злочин, а також у разі, якщо особа раніше відбувала покарання у виді позбавлення волі за умисне кримінальне правопорушення і до погашення або зняття судимості знову вчинила умисне кримінальне правопорушення, за яке вона була засуджена до позбавлення волі) та трьох чвертей (умисний особливо тяжкий злочин, а також покарання, призначене особі, яка раніше звільнялася умовно-дostroково і вчинила нове умисне кримінальне правопорушення протягом невідбутої частини покарання) строку призначеного судом покарання;

– ст. 82 КК України – не менше третини, половини та двох третин призначеного судом покарання відповідно;

– ст. 107 КК України – не менше третини (нетяжкий злочин і за необережний тяжкий злочин), половини (умисний тяжкий злочин чи необережний особливо тяжкий злочин, а також, якщо особа раніше відбувала покарання у виді позбавлення волі за умисне кримінальне правопорушення і до погашення або зняття судимості знову вчинила у віці до вісімнадцяти років нове умисне кримінальне правопорушення, за яке вона засуджена до позбавлення волі) та двох третин (умисний особливо тяжкий злочин, а також, якщо особа раніше відбувала покарання у виді позбавлення волі і була умовно-достоково звільнена від відбування покарання, але до закінчення невідбутої частини покарання та до досягнення вісімнадцятирічного віку знову вчинила умисне кримінальне правопорушення, за яке вона засуджена до позбавлення волі) призначеного судом покарання у виді позбавлення волі [12].

Складність таких розрахунків та потенційні когнітивні фактори обумовлюють **ризик помилкового або свідомо неправильного розрахунку** працівниками виправних установ **відбутого засудженим строку покарання**, що може призвести до несвоєчас-

ного умовно-достокового звільнення від відбування покарання засудженого або заміни покарання більш м'яким та, як наслідок, порушення прав засудженого.

З метою недопущення зазначених порушень, під час здійснення перевірок, визначених Наказом № 400, прокурорами вивчаються матеріали особових справ засуджених, для підтвердження правильності розрахунку фактично відбутого строку покарання, призначеного судом, що потребує залучення значних людських та часових ресурсів.

Враховуючи зазначене, з метою якісного проведення прокурорами перевірок, визначених Наказом № 400, оптимального використання робочого часу та професійних ресурсів авторами розроблено комп'ютерну програму «Автоматичне обчислення строку відбутого засудженим покарання» (Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір від 12.05.2021 № 104528).

Комп'ютерна програма «Автоматичне обчислення строку відбутого засудженим покарання» (далі – Програма) забезпечує автоматичне обчислення строку застосування до засуджених ст.ст. 81, 82, 107 КК України (рис. 1).

Рис. 1. Інтерфейс програми: поля на білому фоні, позначені знаком «*», – обов'язкові для заповнення; у полях на сірому фоні дані відображаються автоматично (у тому числі ступінь тяжкості кримінального правопорушення)

Внесення прокурором (як користувачем) відомостей до Програми здійснюється на підставі даних особової справи засудженого, шляхом їх фіксації у відповідних полях.

Для перевірки правильності розрахунку строку можливого застосування ст.ст. 81, 82, 107 КК України у Програмі підлягають заповненню лише декілька полів з дотриманням такої послідовності: прізвище, ім'я, по батькові засудженої особи;

початок і строк призначеного покарання; кваліфікація кримінального правопорушення (за найтяжчою статтею КК України).

При зарахуванні до строку покарання строку попереднього ув'язнення згідно з ч. 5 ст. 72 КК України (у редакції Закону України від 26.11.2015 № 838-VIII), що діяла до 20.06.2017, користувачу необхідно також заповнити блок «Строк попереднього ув'язнення згідно з ч. 5 ст. 72 КК України (у редакції Закону України

від 26.11.2015 № 838-ХІІІ), що діяла до 20.06.2017.

В окремих випадках необхідна активація додаткових фільтрів Програми, що передбачає внесення відповідних даних:

– якщо особа раніше відбувала покарання у виді позбавлення волі за умисне кримінальне правопорушення і до погашення або зняття судимості знову вчинила умисне кримінальне правопорушення, за яке вона засуджена до позбавлення волі – додати позначку у полі «Раніше судимий»;

– якщо особа, яку раніше умовно-достроково звільнено від відбування покарання, знову вчинила умисне кримінальне правопорушення протягом строку невідбутої частини покарання – додати позначку у полі «ст. 71 КК України»;

– якщо особа засуджена до покарання у виді позбавлення волі за злочин, вчинений у віці до 18 років – додати позначку у полі «ст. 107 КК України».

На основі внесених даних Програма швидко, точно та автоматично здійснює розрахунок строку, відтак усуває «людський фактор» та потенційні ризики зловживань та запобігає помилковому, свідомо неправильному або несвоєчасному обрахунку відбутого засудженим строку покарання. Після внесення всіх (коректних) даних при натисканні кнопки «Про-

вести розрахунок» Програма автоматично розраховує (рис. 2):

– строк покарання з урахуванням ч. 5 ст. 72 КК України (у редакції Закону від 26.11.2015 № 838-ХІІІ), що діяла до 20.06.2017;

– відбутий строк;

– залишок;

– закінчення строку покарання;

– закінчення строку з урахуванням ч. 5 ст. 72 КК України (у редакції Закону від 26.11.2015 № 838-ХІІІ), що діяла до 20.06.2017;

– ст. 81 КК України;

– ст. 82 КК України;

– ступінь тяжкості;

– частину строку покарання для застосування пільги;

– дату настання пільги;

– строк попереднього ув'язнення згідно з ч. 5 ст. 72 КК України (у редакції Закону від 26.11.2015 № 838-ХІІІ), що діяла до 20.06.2017, включно на дату за рішенням суду (при заповненні відповідного поля);

– частину строку покарання для застосування пільги з урахуванням ч. 5 ст. 72 КК України (у редакції Закону від 26.11.2015 № 838-ХІІІ), що діяла до 20.06.2017 (при заповненні відповідного поля).

Обчислення строку застосування ст. ст. 81, 82 КК України

Прізвище інія по батькові: Іванов Василь Васильович

Порядковий номер запису в базі програми: 1

Дата розрахунку: 15.01.2021

Строк покарання з урахуванням ч. 5 ст. 72 КК України: Рік: 5, Міс.: 5, Дн.: 13

Закінчення строку покарання: 14.04.2022

Початок строку покарання: 14.10.2016

Відбуто: Рік: 4, Міс.: 3, Дн.: 1

Закінчення строку покарання з урахуванням ч. 5 ст. 72 КК України: 27.03.2022

Прив'язаний судом строк покарання: Рік: 5, Міс.: 6, Дн.:

Залишок: Рік: 1, Міс.: 2, Дн.: 12

Стаття КК України: 121 Част.: 2

Програма автоматично розраховує частину строку та дату настання пільги

Ступінь тяжкості: Т

Частина строку покарання для застосування пільги: Рік: 3, Міс.: 8, Дн.: 0

Дата настання пільги: 14.06.2020

Частина строку покарання для застосування пільги з урахуванням ч. 5 ст. 72 КК України: Рік: 3, Міс.: 7, Дн.: 13

Дата настання пільги: 27.05.2020

ст. 81 КК України: 2/3

ст. 82 КК України: 1/2

Рік: 2, Міс.: 9, Дн.: 0

Дата настання пільги: 26.06.2019

Строк попереднього ув'язнення згідно з ч. 5 ст. 72 КК України (у ред. до 20.06.2017): Рік: 0, Міс.: 0, Дн.: 18

Друк

Викід

Інший період тримання під вартою (за наявності)

Строк попереднього ув'язнення

Загальний строк попереднього ув'язнення у днях

При натисканні кнопки (за умови коректного введення даних) «Провести розрахунок» Програма автоматично розраховує наступні поля:
- строк з урахуванням ч. 5 ст. 72 КК України;
- відбуто;
- залишок;
- закінчення строку покарання;
- закінчення строку з урахуванням ч. 5 ст. 72 КК України (уред. до 20.06.2017);
- ст. 81 КК України;
- ст. 82 КК України;
- ступінь тяжкості;
- частину строку покарання для застосування пільги;
- дату настання пільги;
- частину строку покарання для застосування пільги з урахуванням ч. 5 ст. 72 КК України (уред. до 20.06.2017);
- ч. 5 ст. 72 КК України включно на дату за рішенням суду (при заповненні полів) України (уред. до 20.06.2017)

Рис. 2. Програма у дії

Таким чином, Програма визначає дату можливого застосування до засудженого ст.ст. 81, 82, 107 КК України.

За результатами проведених розрахунків функціонал Програми надає можливість збереження користувачем отриманого результату та друку його вигляду (рис. 3), а також ведення е-журналу (рис. 4).

Вказана стаття розглядається в аспекті нагляду прокурора, разом з тим зазначимо, що запровадження даної програми в установах виконання покарань України надасть можливість, по-перше, перейти до ведення е-журналу, по-друге, здійснювати маніпуляції з розрахунку строків в автоматичному режимі, у тому числі з використанням вкладки «нагадування».

| Обчислення строку застосування ст.ст. 81, 82, 107 КК України | | | |
|--|--------------------------|------------|---------------|
| Прізвище, ім'я по батькові | Іванов Василь Васильович | | |
| Строк покарання | 5 р. | 6 міс. | дн. |
| Початок строку покарання | 14.10.2016 | | |
| Дата розрахунку | 15.01.2021 | | |
| Строк відбутого покарання | 4 р. | 3 міс. | 1 дн. |
| Закінчення строку покарання | 14.04.2022 | | |
| Строк покарання з урахуванням ч. 5 ст. 72 КК України | 5 р. | 5 міс. | 13 дн. |
| Закінчення строку покарання з урахуванням ч. 5 ст. 72 КК України | 27.03.2022 | | |
| Стаття КК України | ст. 121 ч. 2 | | |
| Ступінь тяжкості | Т | | |
| Частина строку покарання до ст. 81 (ст. 107) КК України | 2/3 | 3 р. | 8 міс. 0 дн. |
| Дата настання пільги | 14.06.2020 | | |
| Частина строку покарання до ст. 81 (ст. 107) КК України з урахуванням ч. 5 ст. 72 КК України | 2/3 | 3 р. | 7 міс. 13 дн. |
| Дата настання пільги з урахуванням ч. 5 ст. 72 КК України | 27.05.2020 | | |
| Частина строку покарання до ст. 82 КК України | 1/2 | 2 р. | 9 міс. 0 дн. |
| Дата настання пільги | 14.07.2019 | | |
| Частина строку покарання до ст. 82 КК України з урахуванням ч. 5 ст. 72 КК України | 1/2 | 2 р. | 8 міс. 12 дн. |
| Дата настання пільги з урахуванням ч. 5 ст. 72 КК України | 26.06.2019 | | |
| Строк попереднього ув'язнення згідно з ч. 5 ст. 72 КК України | 3 | 14.10.2016 | по 01.11.2016 |
| Строк попереднього ув'язнення згідно з ч. 5 ст. 72 КК України (інший період) | 3 | по | |
| Загальний строк попереднього ув'язнення | 18 дн. | | |

Рис. 3. Витяг з Програми

| № п/п | Прізвище І.Б. | Початок строку покарання | Дата обчислення | Ступінь тяжкості | | | Раніше судовий | ст. 71 | ст. 107 | Строк покарання | | | Закінчення строку | ст. 81 | Частина строку | | | Дата настання пільги | Частина строку (залик) | | | Дата настання пільги (залик) |
|-------|--------------------------|--------------------------|-----------------|------------------|-------|---------|----------------|--------|---------|-----------------|------|-----|-------------------|--------|----------------|------|-----|----------------------|------------------------|------|-----|------------------------------|
| | | | | Ст. | Част. | Ступінь | | | | Рік | Міс. | Дн. | | | Рік | Міс. | Дн. | | Рік | Міс. | Дн. | |
| 1 | Іванов Василь Васильович | 14.10.2016 | 15.01.2021 | 121 | 2 | Т | | | | 5 | 6 | | 14.04.2022 | 2/3 | 3 | 8 | 0 | 14.06.2020 | 3 | 7 | 13 | 27.05.2020 |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Рис. 4. «Е-журнал»

Висновки

Сучасний ступінь розвитку інформаційних технологій надає можливість автоматизувати самоповторювані математичні та логічні операції, що застосовне, в тому числі, до нагляду прокурора за додержанням законів при виконанні судових рішень у кримінальних справах.

Створення спеціалізованих автоматизованих електронних алгоритмів на основі норм Закону та з урахуванням практичних напрацювань надає органам прокуратури ефективний та неупереджений інструмент правозастосування.

Рекомендації

В умовах триваючих процесів цифровізації кримінальної юстиції та з урахуванням необхідності оптимального використання органами прокуратури людських та часових ресурсів, доцільне системне впровадження розробленої авторами комп'ютерної програми «Автоматичне обчислення строку відбутого засудженим покарання» (Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір від 12.05.2021 № 104528) як ефективного та неупередженого інструменту правозастосування щодо автоматичного обчислення строку застосування до засуджених ст.ст. 81, 82, 107 КК України під час проведення прокурорами відповідних перевірок в порядку ст. 26 ЗУ «Про прокуратуру».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Про прокуратуру: Закон України від 14.10.2014 № 1697-VII (зі змінами і доповненнями). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1697-18#Text>
2. Про організацію діяльності прокурорів з протидії порушенням прав людини у правоохоронній та пенітенціарній сферах: наказ Генерального прокурора від 29.12.2021 № 400. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0400905-21#n125>
3. Про організацію діяльності прокурорів з протидії порушенням прав людини у правоохоронній та пенітенціарній сферах: наказ Генерального прокурора від 29.12.2021 № 400. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0400905-21#n125>
4. Recommendation Rec (2003) 22 of the Committee of Ministers to member states on conditional release (parole). URL: <https://rm.coe.int/16800ccb5d>
5. Зельдов С.И. Освобождение от наказания и его отбывания. М. : Юрид. лит., 1982. 137 с.
6. Кримінальний процесуальний кодекс України: Закон України від 13.04.2012 № 4651-VI (зі змін. і доп.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4651-17>
7. Кримінально-виконавчий кодекс України: Закон України від 11.07.2003 № 1129-IV (зі змін. і доп.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1129-15#Text>
8. Лемак Р.В. Прокурорський нагляд за додержанням законів в установах виконання покарань : автореф. дис. ... канд. юрид. наук : 12.00.10. X., 2012. 20 с.
9. Курило М.П. Прокурорський нагляд за додержанням прав та законних інтересів засуджених до позбавлення волі : дис... канд. юрид. наук: 12.00.10. X., 1998. 188 с.
10. Скригонюк М.І. Прокурорський нагляд за додержанням законів України при умовно-достроковому звільненні засуджених від кримінального покарання: автореф. дис... канд. юрид. наук: 12.00.10. K., 1999. 20 с.
11. Настасяк О. Обчислення строків при застосуванні до засуджених умовно-дострокового звільнення від відбування покарання. Вісник прокуратури. 2016. № 1 (175). С. 109-119.
12. Кримінальний кодекс України: Закон України від 05.04.2001 № 2341-III (зі змін. і доп.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2341-14#Text>

Received (Надійшла) 25.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.04.2024

**Implementation of the e-system during the monitoring of observance
of the laws in the conditional and early release of convicts
from the punishment or its substitution to a lesser one**

A. Stolitnii

Abstract. The relevance of this study is due to the complexity of calculating the terms of early release from serving a sentence and commutation of the unspent part of a sentence to a milder one. It is noted that potential corruption factors cause the risks of erroneous or deliberately incorrect calculation of the sentence served by a convicted person by correctional officers, which may lead to untimely early release of a convicted person from serving his/her sentence or commutation of the sentence. The author points out that the current level of development of information technology makes it possible to automate self-repetitive mathematical and logical operations, which is applicable, inter alia, to the prosecutor's supervision over the observance of laws in the execution of court decisions in criminal cases. The author emphasises that the creation of specialised automated electronic algorithms based on the provisions of the Law of Ukraine "On Public Prosecution" and taking into account practical developments provides the prosecution authorities with an effective and impartial law enforcement tool. The author describes the functionality and principles of operation of the computer program "Automatic calculation of the term of sentence served by a convict" (Certificate of copyright registration for a work dated 12.05.2021 No. 104528) developed by the authors, which ensures automatic calculation of the term of application of Articles 81, 82, 107 of the Criminal Code of Ukraine to convicts. It is concluded that in the context of the ongoing digitalisation of criminal justice and given the need for optimal use of human and time resources by prosecutors, it is advisable to systematically implement the developed computer program as an effective and impartial law enforcement tool for automatic calculation of the term of application of Articles 81, 82, 107 of the Criminal Code of Ukraine to convicts when prosecutors conduct relevant inspections in accordance with Article 26 of the Law of Ukraine "On Prosecution".

Keywords: prosecutor, supervision, punishment, parole, replacement, term, calculation, automation.

О. М. Тихенко, Л. А. Зозуля, С. В. Зозуля

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

КОМПОЗИЦІЙНІ БЕЗСВИНЦЕВІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ІОНІЗУЮЧИХ ТА НЕІОНІЗУЮЧИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ТА ВИПРОМІНЮВАНЬ

Анотація. Розроблено й досліджено захисні властивості матеріалів для екранування неіонізуючих та іонізуючих електромагнітних полів і випромінювань, притаманних медичному обладнанню. Показано, що стаціонарні магнітні поля доцільно екранувати аморфними кобальтовими та кристалічними залізо-нікелевими сплавами малої товщини. Їх комбінація дозволяє уникати залежності коефіцієнта екранування від напруженості магнітного поля. Розроблено й досліджено захисні властивості композицій на основі латексу та сульфату барію для екранування рентгенівського випромінювання. Встановлено, що за товщини матеріалу 5 мм можливо отримати коефіцієнти екранування 1,4 – 5,8 у залежності від вмісту наповнювача. Розроблено й досліджено захисні властивості композицій на основі латексу й оксиду вольфраму для екранування гама-випромінювань. Визначено, що за товщини матеріалу 5 мм можливо отримати коефіцієнти екранування 1,1 – 3,8 у залежності від вмісту екрануючої субстанції. Вміст сульфату барію та оксиду вольфраму у 30 % за масою не впливає на однорідність матеріалів після висихання. Розтріскування поверхонь не виявлено. Перевагою отриманих композицій є можливість їх нанесення у рідкому стані. Випробування адгезивних властивостей сумішей при нанесенні на бетон та гіпсокартон свідчать про їх відповідність вимогам ДСТУ ISO 2409:2019. Це дозволяє наносити суміші на поверхні будь-якої форми у кілька шарів, що дає змогу регулювати коефіцієнти екранування у залежності від радіаційної та електромагнітної обстановки.

Ключові слова: композиційний матеріал, іонізуюче, неіонізуюче випромінювання, коефіцієнт екранування.

Вступ

У сучасних умовах багато уваги приділяється розробленню й дослідженню ефективності захисту від впливу іонізуючих та неіонізуючих електромагнітних полів та випромінювань композиційними матеріалами. Це пояснюється, у першу чергу тим, що джерела таких випромінювань широко застосовуються у діагностичному та лікувальному обладнанні закладів охорони здоров'я. При цьому спектр таких полів та випромінювань дуже широкий – від магнітних полів нульової частоти (магнітно-резонансні томографи) до частот гамма-променів (променева терапія). При цьому у багатьох медичних пристроях використовується одночасно кілька джерел електромагнітних полів та випромінювань. Особливістю будь-якого медичного обладнання є те, що частина випромінювання є паразитним, тобто таким, що поширюється у середовищі поза функціональною зоною. Багато лікувальних та діагностичних установ розташовані у житлових будинках, де застосування матеріалів із вмістом свинцю заборонено. Крім того, захисні свинцеві конструкції мають великі масогабаритні параметри, що ускладнює технології їх монтажу. Враховуючи високу токсичність свинцю, існує тенденція розроблення захисних матеріалів без його вмісту. Наведене зумовлює актуальність теми дослідження.

Сучасний стан питання

У якості матеріалів для виготовлення захисних екранів від іонізуючого та неіонізуючого випромінювання дедалі більше науковці звертають увагу на композиційні матеріали, які складаються з матриці й наповнювача, що визначає ефективність екранування, та є достатньо ефективними при помірних матеріальних затратах. Додавання до полімерної матриці спеціальних наповнювачів, таких як $BaBi_5O$ [1],

Bi_2O_3 [2], $BaTiO_3$ та $CaWO_4$ [3], $PbCl_2$ [4], $CdTe$ [5], WC [6], WO_2 [7], $Gd_2(SO_4)_3$ [8], $BaSO_4$, Bi_2O_3 та WO_3 [9] покращує захисні властивості композиційних матеріалів для екранування іонізуючого випромінювання. Але більшість з таких композитів мають високу собівартість, подекуди мають низьку механічну міцність та ефективні лише для захисту від гамма-випромінювання низьких енергій.

Щодо екранування електромагнітних випромінювань неіонізуючих енергій, особлива увага науковцями приділяється композиційним матеріалам на основі полімерних матриць наповнених дисперсними вуглецевими наноструктурами [10], зокрема такими як шунгіт та технічний вуглець [11], дрібнодисперсним графітом і графітизованою сажею [12], графітовими пластивцями [13]. Ефективність таких захисних композиційних матеріалів вважається цілком прийнятною для захисту від неіонізуючого випромінювання, однак зі зменшенням товщини захисного покриття, захисні властивості таких композитів зменшуються. Також зазначені матеріали є неефективними для поглинання електромагнітних випромінювань іонізуючих енергій.

Зважаючи на те, що електромагнітні випромінювання неіонізуючих та іонізуючих енергій часто синхронно супроводжують нас у різних сферах життя, зокрема у медичній галузі, доцільним стає завдання виготовлення екрануючих матеріалів для захисту одночасно від неіонізуючого та іонізуючого електромагнітного випромінювання. Досягнення зазначеної мети запропоновано у дослідженнях [14, 15], де у якості захисного матеріалу застосовувались полієфірні композити, армовані ферохромом та ніобієм. Для прискорення реакції полімеризації у вихідні компоненти необхідно вводити додаткові хімічні сполуки (прискорювачі, ініціатори, допанти), що ускладнює технологію виготовлення та є досить дорогавартісним.

Мета роботи – розроблення й дослідження захисних властивостей композиційних матеріалів для екранування неіонізуючих та іонізуючих електромагнітних полів та випромінювань.

Виклад основного матеріалу

Дослідження захисних властивостей матеріалів виконувалося за допомогою повіреної вимірювальної апаратури.

Вимірювання стаціонарних магнітних полів здійснювалося приладом МТМ-01. Вимірювання щільності потоку енергії електромагнітних полів ультрависоких частот здійснювалося вимірювачем напруженості електричних та магнітних полів ПЗ-31. Вимірювання інтенсивності рентгенівського та гамма-випромінювання здійснювалося приладом СРП-88.

Джерелами рентгенівського випромінювання були стандартні рентгенівські трубки медичного призначення з напругами на трубіці 60–150 кВ (50–150 кеВ). Джерелами гамма-випромінювання були лабораторна установка з джерелом ^{60}Co (2,82 МеВ) та промисловий дефектоскоп «Гамарід» з джерелом ^{192}Ir (0,38 МеВ). Джерелом стаціонарного магнітного поля була дослідницька установка з максимальною індукцією магнітного поля 0,98 Тл. Методики вимірювань виключали проникнення полів та випромінювань поза захисним екраном. Дослідження виконувалися послідовно для стаціонарного магнітного поля, змінних електромагнітних полів та іонізуючих випромінювань. Коефіцієнтами екранування вважалися відношення значення поля або випромінювання джерела до показника у захищеній зоні. З методичної точки зору найбільш складною задачею є захист від

впливу стаціонарного магнітного поля. Такі поля генеруються обладнанням медичного призначення (магніторезонансний томограф та ін.) і міським електричним транспортом. Магнітостатичний захист полягає у шунтуванні магнітного поля феромагнітним матеріалом. Воно полягає у замиканні силових ліній у матеріалі з низьким опором магнітному потоку. Тобто ефективність екранування прямо пропорційна магнітній проникності матеріала екрана та зворотно пропорційна площі поперечного перерізу. За фіксованої площі екрана критичною є його товщина.

У загальному випадку екран повинен бути геометрично замкненим. Це ж стосується квазістаціонарних полів промислової частоти. Але значне екранування досягається й без виконання цієї умови, що обумовлене виникнення градієнту магнітної проникності по товщині матеріалу у зовнішньому магнітному полі.

Головною умовою ефективності захисту є великі значення вихідної магнітної проникності. Такій умові відповідають пермалої та аморфні феромагнітні сплави.

Недоліком пермалоїв є критична залежність магнітної проникності від деформації. Аморфні сплави позбавлені цього недоліка. У багатьох випадках магнітна проникність критично залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. Тому для експериментів було обрано аморфний сплав на основі кобальту (вміст кобальту – до 80 %, ТОВ «Мелта», Україна) та сплав нікелю і заліза (80 % та 20 % відповідно).

Було визначено захисні властивості наведених сплавів у залежності від напруженості зовнішнього магнітного поля (рис. 1).

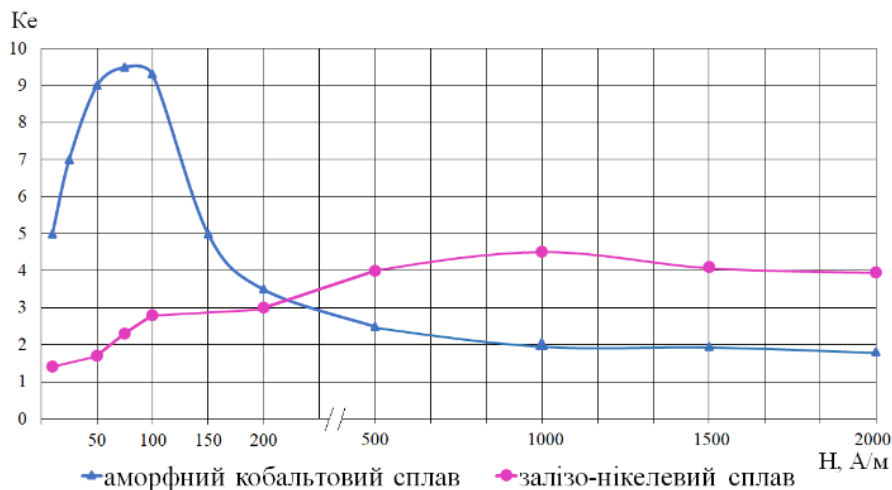


Рис. 1. Залежність коефіцієнта екранування аморфного кобальтового та залізо-нікелевого сплаву від напруженості стаціонарного магнітного поля. Товщина екранів 200–250 мкм

Наведені на рис. 1 захисні залежності обумовлені залежністю магнітних проникностей від напруженості екранованого поля.

Вихідні магнітні проникності кобальтових сплавів складають 9000-10000, залізо-нікелевого сплаву – 800-900. Тому застосування металоолімерних композитів для екранування стаціонарних магнітних полів проблематичне.

Враховуючи, що магнітна проникність композиту на основі магнетиту (вміст 60 % за масою у полімерній матриці) не перевищує 3,0-3,2, для екранування таких полів товщина захисту повинна бути меншою за 1,5- 2,0 см.

Захисні властивості композиту на основі магнетиту та полімеру у області наднизьких та ультрависоких частот достатні для екранування електромагнітних

полів, зареєстрованих на робочих місцях персоналу з обслуговування медичного обладнання. Випробування матеріалів на основі магнетиту товщинами 5 та 10 мм з вмістом магнетиту 60 % у полімерній матриці наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Залежність коефіцієнтів екранування магнітного поля промислової частоти і електромагнітного поля ультрависокої частоти від товщини металополімерного матеріалу (вміст магнетиту 60% (мас.))

| Товщина, мм | Коефіцієнт екранування, в.од. | |
|-------------|-------------------------------|---------|
| | 50 Гц | 2,6 ГГц |
| 5 | 14 – 16 | 22 – 24 |
| 10 | 28 – 30 | 24 – 26 |

Як видно з табл. 1, коефіцієнти екранування достатньо високі, але незначна залежність ефективності екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти від товщини екрана свідчить про переважний внесок у захисні властивості відбиття електромагнітних хвиль. Незважаючи на малу електропровідність магнетиту, коефіцієнт відбиття високий через великий вміст металеві субстанції.

Для розроблення матеріалів, що екранують рентгенівське випромінювання малих інтенсивностей у якості наповнювача використовувався сульфат барію, а матриці – рідкий латекс.

Перевагами цих матеріалів є їхня екологічність, тобто відсутня необхідність визначення можливості їх застосування у житлових будівлях для внутрішнього облицювання окремих приміщень, а також у закладах охорони здоров'я. Було виготовлено зразки завтовшки 5 мм із масовим вмістом сульфату барію 10, 20, 30 % за масою. Результати випробувань наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Залежність коефіцієнта екранування рентгенівського випромінювання від вмісту сульфату барію у полімерній матриці

| Вміст наповнювача, % (мас.) | Коефіцієнт екранування, в.од. |
|-----------------------------|-------------------------------|
| 10 | 1,4 – 1,6 |
| 20 | 2,8 – 3,0 |
| 30 | 5,6 – 5,8 |

Для захисту від гама-випромінювань було виготовлено композиційний матеріал на основі рідкого латексу та технічного окису вольфраму. Окис вольфраму додався у рідкий латекс у кількості 10, 20, 30 % за масою. Після цього суміш висушувалася. Товщина зразків складала 5 мм.

Результати випробувань захисних властивостей наведено у табл. 3.

Враховуючи малий об'ємний вміст наповнювача у матриці, отримані захисні властивості можна вважати прийнятними.

Таблиця 3 – Залежність коефіцієнта екранування гама-випромінювання від вмісту окису вольфраму

| Вміст наповнювача, % (мас.) | Коефіцієнт екранування, в.од. |
|-----------------------------|-------------------------------|
| 10 | 1,1 – 1,2 |
| 20 | 2,4 – 2,5 |
| 30 | 3,7 – 3,8 |

За такого об'ємного вмісту у процесі висихання не порушується однорідність матеріалу й відсутні ознаки розтріскування. Тобто є можливість збільшити масовий вміст окису вольфраму у матриці, що автоматично призводить до підвищення коефіцієнта екранування.

Враховуючи задовільні однорідності сумішей латексу і магнетиту, сульфату барію та окису вольфраму, відкриваються можливості отримання матеріалів для одночасного захисту від іонізуючих та неіонізуючих випромінювань та полів.

Пропорції вмісту компонентів у полімері визначаються фактичними рівнями полів і випромінювань, які потребують екранування.

Було досліджено зчеплення рідких металополімерних сумішей з бетонними та гіпсополімерними покриттями. Випробування згідно ДСТУ ISO 2409:2019 вказують, що покриття відповідають класу 1. Це свідчить про достатні адгезивні властивості композицій.

Таким чином, розроблені композиції можна наносити на поверхні у вигляді листових матеріалів та у рідкому стані. Це значно спрощує впровадження заходів радіаційної та електромагнітної безпеки. Такі суміші можна наносити на поверхні будь-яких конфігурацій у кілька шарів, що дозволяє забезпечити потрібні коефіцієнти екранування електромагнітних полів неіонізуючих та іонізуючих випромінювань.

Висновки

1. Захист від впливу стаціонарних магнітних полів доцільно здійснювати аморфними кобальтовими сплавами та залізо-нікелевими сплавами. Їх комбінація дозволяє уникнути зниження коефіцієнтів екранування внаслідок амплітудної залежності магнітних проникностей обох матеріалів.

2. Розроблений матеріал для екранування рентгенівського випромінювання на основі латексу та сульфату барію має достатні коефіцієнти екранування принаймні для екранування паразитарних випромінювань (1,4 – 5,8 у залежності від вмісту наповнювача).

3. Розроблений матеріал для екранування гама-випромінювань на основі латексу та окису вольфраму має достатні коефіцієнти екранування, принаймні для випромінювань, притаманних лікувальній та дефектоскопічній апаратурі (1,1 – 3,8 у залежності від вмісту окису вольфраму).

4. Отримані результати свідчать, що розроблені композиції можливо застосовувати у рідкому стані, що дозволяє вкривати поверхні складних форм

у кілька шарів. Це забезпечує можливість отримання конкретної радіаційної або електромагнітної обстановки. потрібних коефіцієнтів екранування у залежності від новки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Gürel Özdemir H., Kaçal M.R., Akman F., Polat H., Agar O. Investigation of gamma radiation shielding characteristics of bismuth reinforced ternary composites in wide photon energy region. *Radiation Physics and Chemistry*. 2023. Volume 208. 110924. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110924>.
- Ambika M.R., Nagaiah N., Suman S. K. Role of bismuth oxide as a reinforcer on gamma shielding ability of unsaturated polyester based polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2016. 134 (13). PP. 446-457. Doi: 10.1002/app.44657.
- Akman F., Kaçal M.R., Almousa N., Sayyed M.I., Polat H. Gamma-ray attenuation parameters for polymer composites reinforced with BaTiO₃ and CaWO₄ compounds. *Progress in Nuclear Energy*. 2020. Volume 121. 103257. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103257>.
- Özkalaycı F. Lead(II) chloride effects on nuclear shielding capabilities of polymer composites. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2020. Volume 145. 109543. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2020.109543>.
- Akman F., Ogul H., Kaçal M.R., Polat H., Dilsiz K., Agar O. Gamma attenuation characteristics of CdTe-Doped polyester composites. *Progress in Nuclear Energy*. 2021. Volume 131. 103608. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103608>.
- Nadin Jamal AbuAlRoos, Mira Natasha Azmana, Noorfatin Aida Baharul Amina, Rafidah Zainon. Tungsten-based material as promising new lead-free gamma radiation shielding material in nuclear medicine. *Physica Medica*. 2020. Volume 78. Pages 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.08.017>.
- Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Noskov A.V., Sirota V.V., Zaitsev S.V., Prokhorenkov D.S., Sidelnikov R.V. Gamma radiation attenuation characteristics of polyimide composite with WO₂. *Progress in Nuclear Energy*. 2021. Volume 137. 103795. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103795>.
- Erkoyuncu İ., Akman F., Ogul H., Kaçal M.R., Polat H., Demirkol İ., Dilsiz K., Ertuğral B. A detailed investigation of gamma and neutron shielding capabilities of ternary composites doped with polyacrylonitrile and gadolinium (III) sulfate. *Applied Radiation and Isotopes*. 2023. Volume 196. 110789. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110789>.
- Seon-Chil Kim, Sung-Hyoun Cho. Analysis of the Correlation between Shielding Material Blending Characteristics and Porosity for Radiation Shielding Films. *Journals Applied Sciences*. 2019. 9(9). 1765. <https://doi.org/10.3390/app9091765>.
- Senyk I., Kuryptia Y., Barsukov V., Butenko O., Khomenko V. Development and application of thin wide-band screening composite materials *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. 21(4). pp. 771–778. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.4.771-778>.
- Білоусова Є.С., Мохамед А.М.А., Линьков Л.М., Борботько Т.В. Електромагнітні екрани на основі наноструктурованих вуглецевих матеріалів: монографія. 2018. 317 с.
- Barsukov Viacheslav, Senyk Ilona, Kryukova Olena, Butenko Oksana. Composite Carbon-Polymer Materials for Electromagnetic Radiation Shielding. *Materials Today: Proceedings*. 2018. V. 5. No 8.Part 1. 15909-15914. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.063.
- Halder Krishna Kamal, Tomar Monika, Sachdev V.K., Gupta Vinay. Development of polyvinylidene fluoride–graphite composites as an alternate material for electromagnetic shielding applications. *Materials Research Express*. Volume 6. № 7. 075324. DOI: 10.1088/2053-1591/ab13dd.
- Akman F., Ozkan I., Kaçal M.R., Polat H., Issa Shams A.M., Tekin H.O., Agar O. Shielding features, to non-ionizing and ionizing photons, of FeCr-based composites. *Applied Radiation and Isotopes*. 2021. Volume 167. 109470. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109470>.
- Akman Ferdi, Ogul H., Ozkan I., Kaçal M.R., Agar O., Polat H., Dilsiz K. Study on gamma radiation attenuation and non-ionizing shielding effectiveness of niobium-reinforced novel polymer composite. *Nuclear Engineering and Technology*. 2022. Volume 54. Issue 1, Pages 283-292. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.07.006>.

Received (Надійшла) 26.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.04.2024

**Composite lead-free materials
for protection against ionizing and non-ionizing electromagnetic fields and radiation**

O. Tykhenko, L. Zozulia, S. Zozulia

Abstract. The protective properties of materials for shielding non-ionizing and ionizing electromagnetic fields and radiations inherent in medical equipment have been developed and studied. It has been shown that it is advisable to shield stationary magnetic fields with amorphous cobalt and crystalline iron-nickel alloys of small thickness. Their combination avoids the dependence of the shielding coefficient on the magnetic field strength. The protective properties of compositions based on latex and barium sulfate for shielding X-rays have been developed and studied. It was found that at a material thickness of 5 mm, shielding coefficients of 1.4-5.8 can be obtained, depending on the filler content. The protective properties of compositions based on latex and tungsten oxide for shielding gamma radiation have been developed and studied. It was determined that with a material thickness of 5 mm, it is possible to obtain shielding coefficients of 1.1-3.8, depending on the content of the shielding substance. The content of barium sulfate and tungsten oxide at 30 % by weight does not affect the homogeneity of the materials after drying. No surface cracking was detected. The advantage of the obtained compositions is the possibility of their application in a liquid state. Tests of the adhesive properties of the mixtures when applied to concrete and drywall show that they meet the requirements of State Standard ISO 2409:2019. This makes it possible to apply the mixtures to surfaces of any shape in several layers, which makes it possible to adjust the shielding coefficients depending on the radiation and electromagnetic environment.

Keywords: composite material, ionizing, non-ionizing radiation, shielding factor.

О. О. Ченчева

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОСАДЖЕННЯ ПИЛУ КАРБОНОВИХ КОМПОЗИТІВ ПРИ ШТУЧНІЙ ІОНІЗАЦІЇ ПОВІТРЯ РОБОЧОЇ ЗОНИ

Анотація. **Мета.** Математичне моделювання взаємодії аероіонів з різнофракційними пиловими частинками волокнистих карбонівих композитів невизначеної геометричної, які мають у складі як елементи матриці, так і злами карбонівих волокон. **Методика.** Моделювання здійснювалося шляхом виведення нових прогнозованих залежностей взаємодії аероіонів з елементами пилу, які ґрунтуються на застосуванні рівнянь аеродинаміки, електростатики та масопереносу з урахуванням особливостей пилового та фракційного складу повітряного простору робочого середовища, а також емпіричного методу під час натурального експерименту та аналітичного аналізу отриманих результатів. **Результати.** Отримані результати дозволяють здійснювати оцінку аероіонного складу повітря та вплив на концентрацію пилу при використанні штучної іонізації повітря робочої зони. **Наукова новизна.** Розроблена математична модель поточної концентрації аероіонів при штучній іонізації повітря в робочій зоні під час механічної обробки карбонвмісних волокнистих композитів, яка враховує особливості утворення карбонівих пилу, а саме геометричну форму пилових частинок та взаємодію елементів матриці і волокна композиційного матеріалу з аероіонами. **Практична цінність.** Використання штучної іонізації повітря робочої зони дозволяє прискорити процеси осадження виробничого пилу, який утворюється внаслідок механічної обробки волокнистих композиційних матеріалів, що дозволяє зменшити негативний вплив карбонівих пилу на здоров'я працівників.

Ключові слова: аероіони, пил вуглецевих композитів, моноаерозоль, осадження, респіраторна фракція.

Вступ

Численні дослідження встановили зв'язок між забрудненнями повітря робочих зон виробничим пилом, включаючи аерозолі, біоаерозолі та аероалергени, та шкідливим впливом на здоров'я. Більшість респіраторних проблем тісно пов'язані з дрібними фракціями розміру частинок, які важко піддаються видаленню аспіраційними системами та засобами індивідуального захисту. Враховуючи значний рівень шкідливості волокнистого карбонівих пилу, доцільним є використання ефективних методів очищення повітря в приміщенні від дрібних і наддрібних аерозольних частинок. Незважаючи на те, що аспіраційні системи та нові модифікації респіраторів на достатньому рівні забезпечують захист працівника від пилового навантаження робочого простору, у якості альтернативного методу виникає необхідність оцінити здатність додаткової штучної іонізації робочого приміщення, які заряджають дрібнодисперсні пилові частинки, зменшувати концентрацію карбонівих пилу та мікроорганізмів у робочому середовищі працівника [1].

Аналіз літературних джерел. Будова карбонівих волокнистого композиту має шарувату структуру, армовану щільно укладеними пучками вуглецевих волокон та просочену матрицею (рис. 1), в якості якої може виступати як полімер (вуглець-полімерний композиційний матеріал), так і власне пірвуглець (вуглець-вуглецевий композиційний матеріал). При механічній обробці такого типу матеріалів у повітряний простір виділиться значна кількість пилу, який характеризується наявністю елементів як волокон, так і матриці, які в характеризується різною механікою утворення пилових частинок. При руйнуванні вони відрізняються геометричною формою, що необхідно враховувати при розробці аспіраційних систем, засобів індивідуального захисту та аероіонізаційному видаленні часточок респіраторної фракції з повітряного простору робітника.



Рис. 1. Загальна структура вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу, армованого пучками вуглецевих волокон: а – загальний вигляд матеріалу, б – мікрофотографія структури композиту

Було проведено кілька досліджень повітряного простору та камерних експериментів, щоб перевірити доцільність зменшення частинок за допомогою іонізаторів повітря. Експериментальні дослідження показали, що концентрації дохідних речовин радону в закритому середовищі знижуються після застосування іонізатора повітря [1, 2]. В [3] автор наводить експеримент із видалення крейдяного пилу іонізатором, який демонструє значне зменшення концентрації крейдяного пилу з часом. В іншому дослідженні [2], автори використовували генератор негативних іонів, щоб перевірити його ефективність у зменшенні концентрації сигаретного диму в камері розмірами 0,5 м³ та досягли шестикратного зниження його концентрації. Дослідження [4] дозволяє використовувати техніку іонного душу, застосування якого дозволяє значно знизити концентрації частинок пилу у повітрі в типовому офісному середовищі. Усі ці дослідження чітко демонструють необхідність застосування іонізаторів для очищення повітря. Однак також було відзначено два обмеження іонізаторів. Перше стосується утворення озону, а другий стосується створення субмікронних частинок внаслідок складних газофазних реакцій слідових компонентів,

присутніх поблизу коронного розряду. Очевидно, що зарядження частинок і електроміграція є основними механізмами, відповідальними за видалення частинок пилу, вони повинні бути пов'язані з концентрацією аероіонів і геометричними параметрами карбонового пилу та поєднані з уже існуючими (нормальними) процесами видалення.

Результати дослідження

Серед найбільш перспективних засобів додаткової іонізації повітря є використання ультразвукового гідроаероіонізатора, принцип роботи якого засновано на балоелектричному ефекті та подрібненні води ультразвуком, який здатний нормалізувати аероіонний склад повітря та показники вологості робочого простору обробки карбону та уникнути утворення озону [5]. На основі відомих досліджень, було зроблено висновок, що пилові частинки, заряджені уніполярно випромінювані іони, відштовхуються та мігрують до внутрішніх поверхонь, що призводить до їх швидкого осідання на цих поверхнях. Таким чином, передбачається доцільність використання направленої дії гідроаероіонізатора саме в зону осередку пилоутворення.

Рекомбіновані внаслідок штучної іонізації аероіони мігрують у повітряному просторі та прикріплюються до пилових частинок карбонового композиту, які збільшують швидкість дрейфу до стінок через електричні поля, створені просторовим зарядом. На відміну від систем принцип роботи яких заснований на фільтрації або електростатичних фільтрів, де видалення частинок відбувається локально всередині приладу, у випадку застосування ультразвукового іонізатора повітря зменшення концентрації карбонового пилу здійснюються у загальному об'ємі робочого простору. Для кількісної оцінки ефективності видалення частинок пилу виключно за рахунок емісії аероіонів був визначений коефіцієнт очищення повітря (K_{On}). Для кожного розміру частинок карбонового волокнистого пилу обробленого композиту з аеродинамічним діаметром d_a респіраторної фракції, який визначається як відношення концентрації пилу C_{ni} , виміряної в певний момент часу під час природного розпаду, до концентрації, виміряної в той самий момент часу, коли застосовувалась штучна іонізація повітря робочої зони C_{ui} :

$$K_{On} = \frac{C_{ni}(d_a, t)}{C_{ui}(d_a, t)}, \quad (1)$$

K_{On} представлено як функцію аеродинамічного розміру частинок і тривалості генерації аероіонів. Концентрації пилу композиту C_{ui} також порівнювалися з початковим значенням C_{nui} , іонізатор ($d_a, t=0$), а розпад характеризувався безрозмірним коефіцієнтом концентрації:

$$K_i = \frac{C_{ui}(d_a, t)}{C_{nui}(d_a, t=0)}, \quad (2)$$

Розподіл заряду частинок аероіонів можна оцінити за допомогою моделі дифузійного заряду [4]:

$$n(t) = \frac{d_n kT}{2K_e e^2} \ln \left[1 + \frac{\pi K_e d_n c_i e^2 N_i t}{2kT} \right], \quad (3)$$

де $n(t)$ – це кількість елементарних зарядів, яких набуває частинка за час t за рахунок дифузійної зарядки; d_n – приведений фізичний діаметр частинки, який враховує особливості геометричної форми; $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана; T – температура повітря (К); $K_e = 9,0 \cdot 10^9$ Н м²Кл⁻² – електростатична стала; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – елементарний заряд; c_i – середня теплова швидкість іонів; N_i – кількість іонів у повітрі.

У розрахунках враховується особливості геометричної форми пилової частинки карбонового композиту (d_n). Оскільки форми частинок пилу карбонового волокнистого композиту містять злами волокна і матриці [6, 7], рис. 2, в, вважаємо їх близькими до продовговуватих або тих, що містять різну форму. Виходячи з того, що динамічний коефіцієнт форми в цьому випадку становить $\chi=2,9..3$, то $d_n = \sqrt[3]{d_a^3/2,9}$ [8, 9].

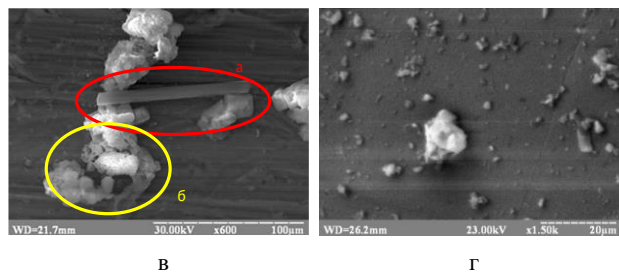


Рис. 2. Мікрофотографія елементів осадженого пилу в – при обробці волокнистого карбонового композиту (а – елементи волокон; б – фрагменти матриці); г – на сталонний зразок через 5 хвилин після завершення свердлування

Перенос аероіонів в робочій зоні обумовлений впливом багатьох факторів. Для визначення поточної концентрації аероіонів у приміщеннях застосовуються наступні рівняння [10]:

$$\begin{aligned} \frac{dN^+}{dt} &= q_n(t) - \alpha N^+ N^- - \beta_e N^+ A + \\ &+ (N^+ - N_0^+(t)) - \lambda_i N^+; \\ \frac{dN^-}{dt} &= q_n(t) - \alpha N^+ N^- - \beta_e N^- A + \\ &+ (N^- - N_0^-(t)) - \lambda_i N^-, \end{aligned} \quad (4)$$

де q_n, q_p – швидкість генерації негативних і позитивних іонів відповідно у робочій зоні; N^-, N^+ – початкова концентрація негативних і позитивних іонів у робочому просторі; α – швидкість рекомбінації аероіонів з аероіонами протилежної полярності; β_e – еквівалентна швидкість комбінації аероіонів з частинками карбонового пилу; A – поточна концентрація пилу; λ_i – електростатичне осадження аероіонів; t – час, N, N^+ – поточні концентрації негативних, позитивних аероіонів відповідно.

У класичному варіанті дослідження процесів взаємодії частинок пилу і аероіонів прийнято використовувати поняття моноаерозоль, тобто вважається, що виробничий пил є однорідним і всі часточки однаково

швидко взаємодіють з аероіонами, однак у випадку композиційних матеріалів це припущення є невірним. Для отримання більш адекватного опису взаємодії було введено поняття β_e – еквівалентна швидкість комбінації аероіонів з частинками карбонового пилу який містить зламані карбонові волокна та елементи матриці. Запропонований коефіцієнт враховує відсоткове співвідношення пилових часточок армувального волокна та матриці (рис. 1), і є середньоарифметичним значенням швидкостей взаємодії кожного окремого елемента матеріалу з аероіонами. У випадку вуглець-вуглецевого композиту таке співвідношення встановили шляхом мікроскопічного аналізу осажденного пилу після механічної обробки:

$$\beta_e = \frac{0,4\beta_g + 0,6\beta_m}{2}$$

де β_g і β_m – швидкість комбінації аероіонів з частинками карбонового волокна і матриці відповідно)

Для опису масопереносу пилу використовується рівняння виду [10]:

$$\frac{dA}{dt} = q_A(t) + (A - A_0(t)) - \lambda_p A, \quad (5)$$

де q_A – швидкість генерації пилових частинок у робочому просторі, яка залежить від режимів обробки карбонового композиту; A_0 – початкова концентрація частинок звичайного виробничого пилу; λ_p – електростатичне осадження карбонового пилу.

Наведемо ряд формул, які необхідні розрахунку параметрів моделі. Параметр розраховується відповідно до залежності [11]:

$$\lambda_i = \frac{b}{\varepsilon_0} (q_e + q_c eA), \quad (6)$$

де b – рухливість аероіонів; ε_0 – електрична стала; q_e – щільність просторового заряду, яка може бути виражена як:

$$q_e = eN^- - eN^+, \quad (7)$$

де e – елементарний заряд.

Електростатичне осадження частинок можна визначити за формулою, наведеною у роботі [10]:

$$\lambda_p = \frac{D_p}{D_i} q_c \lambda_i, \quad (8)$$

де D_p і D_i коефіцієнти дифузії частинок карбонового пилу та аероіонів відповідно; q_c – характеристичне число зарядів.

Характеристичне число зарядів визначається виразом:

$$q_c = \left(4\pi\varepsilon_0 d_n kT / e^2 \right) \times \left[\ln \left[1 + \frac{d_n c p e^2 t}{4\varepsilon_0 kT} \right] - \ln \left[1 + \frac{d_n c n e^2 t}{4\varepsilon_0 kT} \right] \right], \quad (9)$$

де k – стала Больцмана; T – абсолютна температура; c – теплова швидкість аероіонів; d_n – приведений діаметр пилових часток; t – час.

Відзначимо, що в отриманих рівняннях, на відміну від класичної моделі Мауау Y . [10] (4, 5) запропоновані коефіцієнти, які враховують емісію негативних, позитивних аероіонів та пилу в робочому просторі від часу та від фракційного складу пилу волокнистого карбонового композиту. Таким чином ми враховуємо геометричну форму та швидкість взаємодій окремих частинок пилу, які містять елементи волокна і матриці, що за своєю природою відрізняються у такій взаємодії. Система наведених рівнянь замикається завданням початкових умов:

$$A \Big|_{t=0} = A_0, \quad (10)$$

$$N^- \Big|_{t=0} = N^-_0, \quad (11)$$

$$N^+ \Big|_{t=0} = N^+_0. \quad (12)$$

Дані умови визначають початкові значення величин концентрації пилу, негативних та позитивних аероіонів відповідно перед початком іонізації повітря у приміщенні. Але, дана модель матиме певну відповідність дійсності, якщо припустити, що всередині робочого простору відбувається достатній рух повітряних мас.

Аналіз отриманих даних та проведених досліджень призводить до того факту, що помітний вплив іонізації проявляється навколо джерела іонізації, де концентрація іонів вище. Підвищення пилоутворення при одночасній гідроаероіонізації генерують важкі іони, які утворюються при взаємодії легких іонів із карбоновим пилом. Важкі іони швидше осідають під великою вагою, що призводить до збільшення частинок пилу на поверхнях оброблювального обладнання. На концентрацію карбонового пилу також впливає вологість робочої зони, на меншій відстані від джерела іонізації при підвищеній вологості концентрація пилових частинок композиту очікувано буде вищою.

З метою визначення ефективності застосування процесу іонізації повітряного простору робочого місця було виконано порівняльне дослідження кількості осажденного пилу за допомогою растрового мікроскопу РЕМ-106-И (рис. 2, г) та аналітичних вагів RADWAG AS 60/220, а також концентрації пилових частинок у повітрі при якому порівнювалася швидкість осадження пилових частинок при обробці свердлуванням карбон-карбонового композиту у звичайних умовах та при використанні штучної іонізації при ідентичних режимах і параметрах свердлування.

Ефективність оцінювалася шляхом мікроскопічного порівняння і зважування на аналітичних вагах еталонних зразків площі осадження через проміжки часу, які становили 5 хв., 10 хв. та 30 хвилин, а також визначення концентрації пилу у робочій зоні свердлувальника за допомогою SDS011 сенсорів пилу PM2.5 та PM10.

Результати дозволяють констатувати, що використання гідроаероіонізації робочого повітряного

простору приміщення дозволяє прискорити осадження карбонового пилу в середньому на 19 % та зменшити його концентрацію у повітрі на 14 % через 10 хвилин після завершення процесів свердлування.

Висновки

Застосування штучної гідроаероіонізації повітряного робочого простору приміщення дозволяє пришвидшити процеси осадження пилових частинок, які утворюються при механічній обробці карбонвмісних волокнистих композитів, що дозволяє зменшити негативний вплив карбонового пилу на здоров'я працівників.

Пил волокнистих карбонових композитів при механічній обробці не можна представити у вигляді

моноаерозолу, оскільки він містить елементи як матриці, так і армувальних волокон у складі, які відрізняються за своїми параметрами та структурою. Розроблена математична модель урахування аероіонного складу повітря та його взаємодії дозволяє враховувати особливості утворення пилу, його фракційного складу, різнокомпонентність, геометричну форму, а також початкову концентрацію пилу робочої зони.

Проведені натурні експерименти визначення ефективності застосування штучної гідроаероіонізації з метою осадження виробничого пилу робочого простору підтвердили його доцільність та довели зменшення концентрації пилу у повітрі робочого простору на 14 % через 10 хвилин після припинення свердлування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sawant V., Meena G. and Jadhav D. (2012). Effect of Negative Air Ions on Fog and Smoke. *Aerosol Air Qual. Res.* 12: 1007-1015. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.11.0214>
2. Kunal Ghosh, S. N. Tripathi, Manish Joshi, Y. S. Mayya, Arshad Khan & B. K. Sapra (2021) Effect of charge on aerosol microphysics of particles emitted from a hot wire generator: Theory and experiments, *Aerosol Science and Technology*, 55:9, 1084-1098, DOI: 10.1080/02786826.2021.1931011.
3. K. L. Aplin and R. G. Harrison, The interaction between air ions and aerosol particles in the atmosphere, *Int. Phys. Conf. Ser. No 163 411 Paper presented at the 10th Int. Conf., Cambridge, 28-31 March 1999*, 411-414.
4. Zygmunt Grabarczyk, Effectiveness of indoor air cleaning with corona ionizers, *Journal of Electrostatics*, Volumes 51–52, 2001, Pages 278-283, ISSN 0304-3886, [https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(01\)00058-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(01)00058-4).
5. В. В. Ченчевой, С. В. Сукач, О. О. Ченчева, Н.С. Федорова Д. С. Григор'єва Дослідження параметрів гідроаероіонного складу повітря робочого приміщення з ультразвуковою іонізацією, *ВІСТІ Донецького гірничого інституту №2 (47)*, 2020, 168-175. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-2-168-175>
6. Salenko A., Chencheva O., Glukhova V., Shchetynin V., Budar M. R. F., Klimenko S., & Lashko E. (2020). Effect of slime and dust emission on micro-cutting when processing carbon-carbon composites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (1 (105)), 38–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203279>
7. Ченчева О. (2023). Аналіз фракційного складу пилу робочої зони при свердлуванні композиційних матеріалів на основі карбонових волокон. *Екологічна безпека та природокористування*, 46(2), 100–108. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.100-108>
8. Uk Lee B, Yermakov M, Grinshpun SA. Removal of fine and ultrafine particles from indoor air environments by the unipolar ion emission. *Atmos Environ* (1994). 2004 Sep;38(29):4815-4823. doi: 10.1016/j.atmosenv.2004.06.010. Epub 2004 Aug 12. PMID: 32834730; PMCID: PMC7319258.
9. Ветошкін А. Г., Таранцева К. Р. *Технологія захисту навколишнього середовища (теоретичні основи): Навчальний посібник. Вид-во технол. ен-та, 2004. - 249 с.*
10. Y. S. Mayya, B. K. Sapra, Arshad Khan, Faby Sunny, Aerosol removal by unipolar ionization in indoor environments, *Journal of Aerosol Science*, Volume 35, Issue 8, 2004, Pages 923-941, ISSN 0021-8502, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2004.03.00>
11. Noakes, C. J., Sleight, P. A. and Beggs, C. (2007) Modelling the air cleaning performance of negative air ionisers in ventilated rooms. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms - Roomvent 2007. Roomvent 2007, 13-15 June 2007, Helsinki.*

Received (Надійшла) 11.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 03.04.2024

Mathematical simulation of dust settlement processes of carbon composites during artificial ionization of the air in the working area

Olga Chencheva

Abstract. Purpose. Mathematical modeling of the interaction of aeroions with multi-fraction dust particles of fibrous carbon composites of undefined geometry, which include both matrix elements and carbon fiber fractures. **Method.** The modeling was carried out by deriving new predicted dependencies of the interaction of aeroions with dust elements, which is based on the application of aerodynamics, electrostatics and mass transfer equations, taking into account the peculiarities of the dust and fractional composition of the air space of the working environment, as well as the empirical method during the field experiment and analytical analysis of the obtained results. **Results.** The obtained results make it possible to evaluate the aeroionic composition of the air and the effect on the dust concentration of the artificial ionization of the air in the working area. **Scientific novelty.** The mathematical model took into account the peculiarities of dust formation during the processing of fibrous carbon composites, the geometric shape of the formed dust particles and the speed of interaction of individual dust components containing elements of the matrix and fibers of the composite material with aeroions of the air during artificial ionization of the working space. **Practical value.** The use of artificial ionization of the air in the working area allows you to accelerate the deposition of industrial dust, which is formed as a result of the mechanical processing of fibrous composite materials, which allows you to reduce the negative impact of carbon dust on the health of workers.

Keywords: aeroions, dust of carbon composites, monoaerosol, deposition, respiratory fraction.

В. М. Почерняєв¹, М. С. Магомедова², Н. М. Сивкова¹

¹ Національна академія Служби безпеки України, Київ, Україна

² Київський фаховий коледж зв'язку, Київ, Україна

ПЛОСКА ФАЗОВАНА АНТЕННА РЕШІТКА ДЛЯ МОБІЛЬНИХ ЦИФРОВИХ СТАНЦІЙ ЗВ'ЯЗКУ «ТОЧКА-БАГАТОТОЧКА» НВЧ ДІАПАЗОНУ

Анотація. В роботі розглянуто плоску фазовану антенну решітку для мобільних цифрових станцій зв'язку «точка-багатоточка» НВЧ діапазону. В роботі отримано аналітичний вираз для залежності коефіцієнта спрямованої дії плоскої фазованої антенної решітки від кутів сканування. Наведені графіки зміни діаграми спрямованості в залежності від дискрету фази. Надані таблиці по зміну рівня головного пелюску. Ці зміни відображені позначками «+» та «-» в даних таблицях. З результатів чисельних розрахунків зроблено висновок, що практично у всьому діапазоні зміни величини $\sin\theta_0\cos\varphi_0$ можливо користуватися приблизною формулою, що отримана в роботі. Наведено графік чисельних розрахунків в залежності величини дискретної зміни фази від коефіцієнта спрямованої дії антени. Таблиці показують, що з достатньої практики точністю можливо користуватися формулою для значень $0 \leq \sin\theta_0\cos\varphi_0 \leq 1$ та дискретної зміни фази $\Delta = \pi/2$. Також визначено головний пелюсток діаграми спрямованості при скануванні з урахуванням наведених паразитних пелюстків.

Ключові слова: мобільна цифрова станція зв'язку, НВЧ діапазон, плоска фазована антенна решітка, діаграма спрямованості, коефіцієнт спрямованої дії.

Вступ

Мобільні цифрові станції зв'язку «точка-багатоточка» НВЧ діапазону, наприклад, мобільна вузлова цифрова тропосферна станція [1] у своєму складі мають фазовану антенну решітку (ФАР). Для мобільних цифрових станцій зв'язку НВЧ діапазону можуть застосовуватися хвилеводні плоскі ФАР. При чому, в якості хвилеводів, можуть використовуватися частково заповнені діелектриком хвилеводи. Як правило, ФАР включають фазообертачі, які дискретно перемикаються (рис. 1).

На рис. 1 позначено: ЕВ – елемент випромінювання; φ – фазообертач; Прд Г, Прд В – передача з горизонтальною або вертикальною поляризацією; Прм Г+В, Прм В+Г – прийом одночасно з горизонтальною та вертикальною поляризаціями.

Тому важливо знати, як змінюється один з найважливіших параметрів ФАР – коефіцієнт спрямованої дії (КСД) у діапазоні кутів сканування.

Аналіз літературних джерел. Мобільні цифрові станції зв'язку НВЧ діапазону з просторово-рознесеною передачею сигналів [2, 3] та з просторово-рознесеним прийомом [4] використовують плоскі ФАР. Теоретичні основи плоских ФАР, які використовують частково заповнені діелектриком хвилеводи визначені в роботах [5–7]. В плоских ФАР використовуються пристрої на частково заповнених діелектриком хвилеводах: комутаційний фазообертач [8],

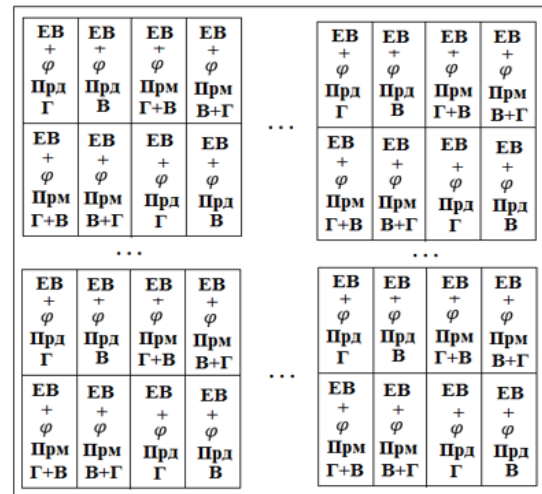


Рис. 1. Фазована антенна решітка мобільної цифрової станції за зв'язку «точка-багатоточка» НВЧ діапазону

фазочастотний пристрій [9], перемикач-фільтр [10], обмежувач потужності НВЧ [11].

Мета роботи. Отримати аналітичний вираз для залежності КСД плоскої ФАР від кутів сканування.

Основна частина

Запишемо вираз діаграми спрямованості (ДС) плоскої ФАР з дискретною зміною фазування у вигляді:

$$F(\sin\theta\cos\varphi) = \frac{1}{d} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_m \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \exp \left[jkx \left[\sin\theta - \sin\theta_0 \left(1 - \frac{2\pi m}{\Delta} \right) - \frac{n\lambda}{d} \right] \right] dx, \quad (1)$$

де d – період ФАР; $a = Nd, N$ – кількість випромінювачів ФАР; $k = 2\pi/\lambda$, k – хвильове число, λ – довжина хвилі; θ_0 – напрям випромінювання, перпендикулярний ФАР; Δ – величина дискретної перебудови фази; $C_m = (-1)^m \sin \frac{\Delta}{2} / (\frac{\Delta}{2} - m\pi)$.

Важливо знати рівень головного максимуму ДС при скануванні з урахуванням накладання паразитних пелюсток. Вважаючи (1) $\sin\theta = \sin\theta_0$, опус-

каючи нескінченні межі підсумовування і проводячи інтегрування, отримуємо значення ДС по головному максимуму:

$$F(\sin\theta_0 \cos\varphi_0) = (N + 1)^4 \times \left[\sum_n \sum_m C_m \left[\sin \frac{ka}{2} \left(\frac{2m\pi \sin\theta_0 \cos\varphi_0}{\Delta} - n\lambda/d \right) \right] \right] / \left[\frac{ka}{2} \left(\frac{2m\pi \sin\theta_0 \cos\varphi_0}{\Delta} - \frac{n\lambda}{d} \right) \right]^2. \quad (2)$$

Розглянемо окремий випадок, коли $\Delta = \pi/2, \lambda/d = 2$. Тоді $m = n/2 \sin\theta_0 \cos\varphi_0$, і, отже $\sin\theta_0 \cos\varphi_0 = n/2m$.

Якщо у (2) підставити $\sin\theta_0 \cos\varphi_0 = \frac{1}{2}q$, тоді $m=qn$ і формула (2) набуває такого вигляду:

$$F(\sin\theta_0 \cos\varphi_0) = (N + 1)^4 \cdot \left\{ \begin{array}{l} \left[C_0 + \frac{\sin \frac{\Delta}{2}}{q} \left(\text{ctg} \frac{\Delta}{2q} - \frac{2q}{\Delta} \right) \right]^2, \text{ якщо } q - \text{ парне;} \\ \left[C_0 + \frac{\sin \frac{\Delta}{2}}{q} \left(\cos \frac{\Delta}{2q} - \frac{2q}{\Delta} \right) \right]^2, \text{ якщо } q - \text{ непарне;} \end{array} \right\}. \quad (3)$$

Формула (3) справедлива для $\sin\theta_0 \cos\varphi_0 = p/q$, де $p \leq q$. За інших значеннях $\sin\theta_0 \cos\varphi_0$ основний внесок вноситься членом з індексом $m = n = 0$. При цьому отримуємо відомий результат теорії скануючих антенних систем [12]: $F(\sin\theta_0 \cos\varphi_0) = (N + 1)^4 C_0^2$.

A_0 , обумовленого накладанням на нього паразитних пелюсток залежно від величини $q/2$ показано в табл. 1. Знаками «+» та «-» позначені відхилення головного максимуму ДС. Змінюючи величину q і варіюючи членом p , можна знайти рівень головного максимуму ДС при всіх значеннях $0 \leq \sin\theta_0 \cos\varphi_0 \leq 1$.

Зміни рівня головного максимуму по амплітуді

Таблиця 1 – Зміни рівня головного максимуму по амплітуді A_0

| $q/2$ | Для «+» - °; «-» - x | | | | | | | |
|-------------------|----------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| $(A_0 - C_0)/C_0$ | | | | | | | | |
| -10 | | | | | | | | |
| -20 | ° | x | | | | | | |
| -30 | | ° | x | x | | | | |
| -40 | | | ° | ° | x | x | | |
| -50 | | | | | ° | ° | x | x |
| -60 | | | | | | | ° | |

З чисельних розрахунків можна зробити висновок, що якщо не потрібна висока точність, то практично в усьому діапазоні зміна величин $\sin\theta_0 \cos\varphi_0$ можна скористатися результатом $F(\sin\theta_0 \cos\varphi_0) = (N + 1)^4 C_0^2$.

Одним із найважливіших параметрів ФАР є сектор огляду простору. Максимальне відхилення

променю від нормалі в плоскій гостронаправленій ФАР, що реалізується на практиці, не перевищує $\pm 60^\circ$. Сканування у такому секторі супроводжується значною зміною КСД. Визначити КСД плоскої ФАР можна за методикою [13]. Дотримуючись попередніх параметрів $\Delta = \pi/2, \lambda/d = 2$ запишемо формулу для КСД плоскої ФАР з дискретною зміною фази:

$$D(\sin\theta_0 \cos\varphi_0) = \left(\frac{d^2}{\lambda^2} \right) \times \left[(4\pi(N + 1)^2) / \left(\sum_n \sum_m F_n F_m \right) \right]. \quad (4)$$

Вираз для F_n такий:

$$F_n = \left[\frac{1 + |\Phi|}{2\sqrt{|\Phi|}} \right] - \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{|\Phi|}} \left[1 - 2C \left(\sqrt{\frac{ka|\Phi|}{2}} \right) + \left(1 - S \left(\sqrt{\frac{ka|\Phi|}{2}} \right) \right) \right], \quad (5)$$

$C(\sqrt{ka|\Phi|/2}), S(\sqrt{ka|\Phi|/2})$ – дійсна та уявна частини інтеграла Френеля ($F(x) = C(x) + jS(x)$), $|\Phi| = 1 - (\sin\theta_0 \cos\varphi_0) \left(1 - \frac{2n\pi}{\Delta} \right) + n\lambda/d$.

Вираз для F_m такий самий, як і (5) для F_n , тіль-

ки n змінюється на m . У табл.2 показано зміну рівня головного максимуму по амплітуді A_1 залежно від величини $q/2$, де знаками «+» і «-» позначені відхилення головного максимуму у більшу і меншу сторону.

Таблиця 2 – Зміна рівня головного максимуму по амплітуді A_1

| $q/2$ $(A_1 - C_1)/C_1$ | Для «+» - °; «-» - × | | | | | | | |
|----------------------------|----------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| -10 | | × | ° | | | | | |
| -20 | | | × | ° | ° | | | |
| -30 | | | | × | × | ° | ° | |
| -40 | | | | | | × | × | ° |
| -50 | | | | | | | | × |
| -60 | | | | | | | | |

З табл. 2 можна дійти висновку, що з достатньої практиці точності можна користуватися формулою (4) для значень $0 \leq \sin\theta_0 \cos\varphi_0 \leq 1$ і дискретною перебудовою фази $\Delta = \pi/2$.

Розрахунок за формулою (4) також свідчить наступне. При $\lambda/d = 2$ при будь-якому $\sin\theta_0 \cos\varphi_0$ в області видимих кутів присутні паразитні пелюстки, тому КСД антенної решітки зі скануванням завжди нижче в напрямку головного максимумів, ніж у звичайних антенних решіток. На рис. 2 показано залежність КСД від величини $\sin\theta_0 \cos\varphi_0$. Провали ДС приблизно в $[1 + 2\sqrt{a/\lambda}]$ відхиляють реальну криву від ідеалізованої. При $1/2 < d/\lambda < 1$ спостерігається сильніший ефект зрізаної кривої, ніж у випадку $d = \lambda/2 (\lambda/d = 2)$ (рис. 3). Ця зрізаність обумовлена періодичністю антенної решітки.

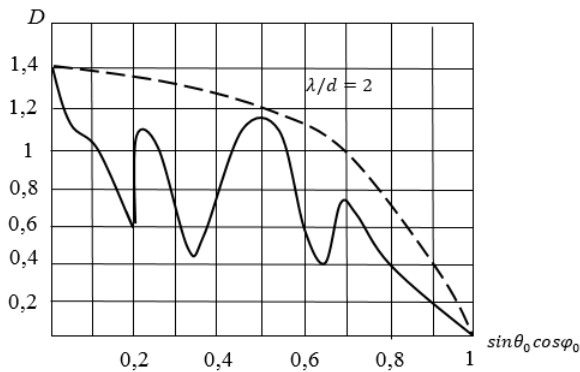


Рис. 2. Залежність КСД від величини $\sin\theta_0 \cos\varphi_0$ при $\lambda/d = 2$

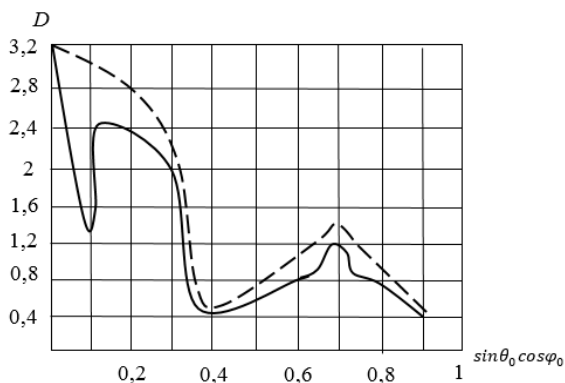


Рис. 3. Залежність КСД від величини $\sin\theta_0 \cos\varphi_0$ при $1/2 < d/\lambda < 1$

В теорії ФАР важливим питанням є вплив величини дискретної перебудови фази на КСД антенної решітки. Отримання чисельних результатів показано на рис. 4: для $\Delta = \pi/8$ на рис. 4, а; для $\Delta = \pi/4$ на рис. 4, б; для $\Delta = \pi/3$ на рис. 4, в.

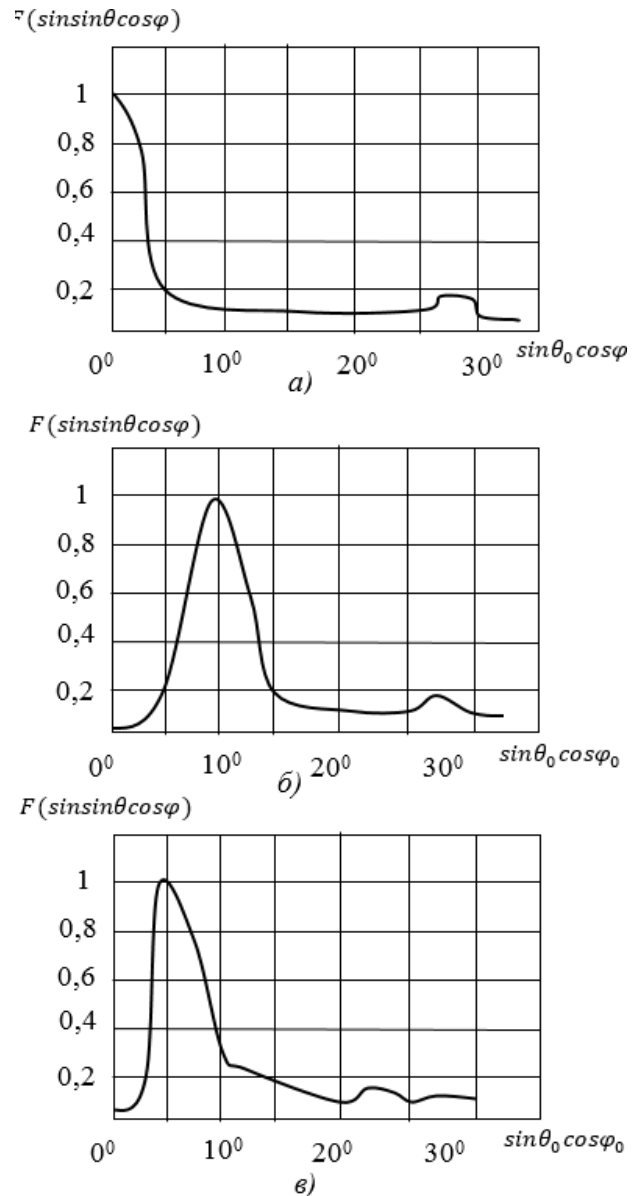


Рис. 4. Зміни діаграми спрямованості в залежності від дискрети фази

Висновки

На закінчення відзначимо, що графіки на рис. 2, 3 наведено для випадку $N=64$ з урахуванням впливу паразитних пелюсток перших двох порядків. Пунктирною лінією позначений графік для КСД ФАР з ідеальним фазуванням. Значення КСД у про-

валах знижується приблизно в $[1 + 2\sqrt{a/\lambda}]$ раз. Чисельні результати показують, що при $d/\lambda = 0,375$, $N=64$ і при кутах сканування $10^\circ \dots 30^\circ$ КСД плоскої ФАР буде найбільшим при $\Delta = \pi/4$. При кутах сканування $30^\circ \dots 45^\circ$ КНД плоскої ФАР буде найбільшим при $\Delta = \pi/6$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Патент №126206 України на винахід. Мобільна вузлова цифрова тропосферна станція. Почерняєв В. М., Повхліб В. С., Наритник Т. М.; опубл. 31.08.2022 // Бюл.№35.
2. Почерняєв В. М., Сивкова Н. М., Повхліб В. С. Просторово-рознесена передача сигналів в цифрових тропосферних станціях. *Наукові праці ОНАЗ ім.О.С.Попова*. 2020. № 2. С. 92–99.
3. Сайко В. Г., Наконечний В. С., Баховський П. Ф., Сивкова Н. М. Алгоритм реалізації методу завадостійкого прийому сигналів, які випромінюються просторово рознесеними передавачами. *I International Scientific and Practical Conference*. Stockholm, Sweden 5-7 April 2020. С. 247–253.
4. Почерняєв В. М., Повхліб В. С. Мобільна цифрова станція НВЧ діапазону подвійного призначення. *Наукові праці ОНАЗ ім. ОС Попова*. 2014. № 2. С. 76–82.
5. Pochernyaev V. N., Skrupnik L. V. Eigenfunctions of a partially filled rectangular waveguide. *Radiophysics and quantum electronics*. 1990. № 12. P. 1023–1028.
6. Почерняєв В. М., Цибізов К. М. Теорія складних хвильоводів. *Науковий світ*, 2003. 223 с.
7. Почерняєв В. М., Сивкова Н. М. Зовнішні параметри з'єднання прямокутного хвильовода, частково заповненого лінійним діелектриком з прямокутним хвильоводом, частково заповненим нелінійним діелектриком. *Вісник Університету «Україна»*. 2020. № 1(28). С. 100–105.
8. Pochernyaev V., Mahomedova M., Syvkova N. Комутаційний фазообертач на частково заповненому діелектриком прямокутному хвильоводі. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава : НУ ПП, 2023. № 1(71). С. 171–176. DOI: 10.26906/SUNZ.2023.1.171.
9. Почерняєв В. М., Магомедова М. С., Сивкова Н. М. Фазо-частотний пристрій на частково заповненому діелектриком прямокутному хвильоводі. *Системи управління, навігації та зв'язку*. № 4 (70). Полтава : НУ ПП, 2022. С. 158-161. DOI: 10.26906/SUNZ.2022.4.158.
10. Pochernyaev, V., Syvkova, N., Mahomedova, M. Switch-filter on a rectangular waveguide partially filled by dielectric. *Інформатика, Автоматика, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. 2022. № 12(3). P. 8-11.
11. Почерняєв В. М., Магомедова М. С., Сивкова Н. М. Обмежувач потужності НВЧ на частково заповнених діелектриком прямокутних хвильоводах. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*. 2022. № 1. С. 90-101.
12. Скануючі антенні системи НВЧ / Під. ред. Маркова Г. Т., Чапліна А. Ф. 1966. Т.1. 536 с.
13. Воскресенський Д. І., Пономарьов Л. І., Філіппов В. С. Випуклі скануючі антени. 1978. 304 с.

Received (Надійшла) 25.01.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.04.2024

Flat phased antenna array for mobile digital point-to-multipoint HF communication stations

V. Pochernyaev, M. Mahomedova, N. Syvkova

Abstract. The article considers a flat phased antenna array for mobile digital «point-to-multipoint» communication stations in the microwave range. In the article, an analytical expression for the dependence of the directional action coefficient of a flat phased antenna array on the scanning angles are obtained. Graphs of changes in the directional pattern depending on the discrete phase are given. Tables for changing the level of the main beam are given. These changes are reflected by «+» and «-» signs in these tables. From the results of numerical calculations, it was concluded that it is possible to use the approximate formula obtained in the article in almost the entire range of changes in the value of $\sin\theta_0\cos\varphi_0$. A graph of numerical calculations is given depending on the magnitude of the discrete phase change on the coefficient of directional action of the antenna. The tables show that with sufficient practice, it is possible to use the formula with accuracy for the values $0 \leq \sin\theta_0\cos\varphi_0 \leq 1$ and the discrete phase change $\Delta = \pi/2$. The main beam of the directional pattern during scanning is also determined, taking into account the listed parasitic beams.

Keywords: mobile digital communication station, microwave range, flat phased antenna array, directional pattern, coefficient of directional action.

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

| | | | | | |
|--------------------|-----|------------------|-----|-------------------|-----|
| Аль-Амморі Алі | 53 | Кайда В. В. | 78 | Паронікян П. А. | 70 |
| Аль-Амморі Х. А. | 53 | Капитон А. М. | 144 | Партика С. О. | 122 |
| Андрєєв С. М. | 11 | Каргін А. О. | 106 | Плєхова Г. А. | 28 |
| Бараненко Р. | 60 | Клочан А. Є. | 53 | Попович Б. Р. | 138 |
| Башкіров М. О. | 127 | Коваленко А. А. | 141 | Почерняєв В. М. | 187 |
| Бережний А. | 47 | Кожевніков Г. К. | 111 | Радченко І. В. | 141 |
| Беспалий А. В. | 82 | Коломєць Б. М. | 64 | Савчук В. П. | 24 |
| Бовчалюк С. Я. | 64 | Коломєць В. С. | 64 | Сальніков С. С. | 155 |
| Бондаренко М. Е. | 99 | Колтун Ю. М. | 82 | Сас Н. | 60 |
| Бороздін М. К. | 44 | Костікова М. В. | 28 | Сатулов А. І. | 24 |
| Бульба С. С. | 67 | Кузьменко В. С. | 169 | Семеренко Ю. О. | 67 |
| Вжеснєвський М. О. | 34 | Кузьменко О. Ю. | 169 | Сивкова Н. М. | 187 |
| Волк Д. М. | 152 | Курбанова О. | 60 | Симбірський Г. Д. | 28 |
| Волк М. О. | 70 | Курочкін В. С. | 70 | Ситник О. В. | 141 |
| Гарашенко Я. В. | 64 | Кучук Г. А. | 152 | Скакаліна О. В. | 144 |
| Гієвський Д. О. | 106 | Кучук Н. Г. | 122 | Соловійова О. І. | 67 |
| Головань А. І. | 18 | Ладоня В. Г. | 115 | Соломоненко Ю. С. | 5 |
| Горелик С. І. | 11 | Лахтіна А. В. | 11 | Стеблянко Б. О. | 152 |
| Гук А. С. | 87 | Левченко А. О. | 78 | Столітній А. В. | 173 |
| Гулевич М. В. | 74 | Лєві Л. І. | 44 | Тихенко О. М. | 179 |
| Гурін А. П. | 5 | Лисиця Д. О. | 122 | Тристан А. | 47 |
| Дегтярєва А. О. | 53 | Ляшова А. О. | 122 | Федорченко В. М. | 95 |
| Дзигар А. К. | 24 | Магомєдова М. С. | 187 | Філімончук Т. В. | 135 |
| Дяченко Д. О. | 78 | Майстрєнко Г. В. | 135 | Худов Г. В. | 5 |
| Єрємїна Н. С. | 82 | Масленко О. В. | 5 | Хулап А. В. | 90 |
| Жовтонїжко Д. С. | 87 | Матяш О. Ю. | 111 | Чала О. О. | 34 |
| Жуков Д. | 47 | Мезін Д. О. | 122 | Ченчева О. О. | 183 |
| Заволодько Г. Е. | 138 | Мелешко Є. В. | 115 | Черниш Д. С. | 111 |
| Заковоротний О. Ю. | 90 | Минко П. Є. | 5 | Шєховцов О. В. | 141 |
| Залєський В. Д. | 95 | Мінухін С. В. | 127 | Шипунов М. Ю. | 163 |
| Запорожець О. В. | 39 | Міхаль О. П. | 78 | Шкурко О. П. | 53 |
| Запорожченко А. П. | 70 | Можаєв О. О. | 87 | Шматко О. В. | 155 |
| Здорик Н. В. | 99 | Мостова А. | 60 | Шматько Ю. М. | 82 |
| Зінченко Д. О. | 24 | Нєчаусов А. С. | 11 | Штефан Н. В. | 39 |
| Зозуля Л. А. | 179 | Ні О. В. | 152 | Юдін О. В. | 163 |
| Зозуля С. В. | 179 | Ніколаєнко Д. С. | 135 | Якимєнко М. С. | 115 |
| Зубенко В. П. | 87 | Олійник Д. Г. | 106 | Ястреба О. С. | 44 |
| Івановський П. С. | 95 | Онищенко О. І. | 99 | Яценко І. С. | 39 |
| Іващенко Г. С. | 99 | Очерєтенко С. В. | 28 | | |

Наукове видання

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Збірник наукових праць

Випуск 2 (76)

Відповідальна за випуск *К. С. Нестеренко*

Технічний редактор *Т. В. Уварова*

Коректор *О. В. Морозова*

Комп'ютерна верстка *Н. Г. Кучук, І. Ю. Петровська*

Оформлення обкладинки *І. В. Льїна*

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

Підписано до друку 07.05.2024. Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 24,0. Тираж 130 прим. Зам. 507-24

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