

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

KHARKIV NATIONAL
UNIVERSITY OF RADIO ELECTRONICS

RADIOTEKHNKA

**All-Ukrainian
interdepartmental scientific and technical collection**

ISSN 0485-8972
eISSN 2786-5525

Founded in 1965

I S S U E 2 1 9

Kharkiv
Kharkiv National
University of Radio Electronics
2024

UDC 621.3

The collection is included in the List of scientific professional publications of Ukraine, category «Б», technical and physical-mathematical sciences (approved by orders of the Ministry of Education and Science from 17.03.2020 № 409; from 02.07.2020 № 886; from 24.09.2020 № 1188) by specialties: 105 – Applied Physics and Nanomaterials; 125 – Cybersecurity and information protection; 163 – Biomedical Engineering; 171 – Electronics; 172 – Electronic communications and Radio Engineering; 173 – Avionics; 174 – Automation and Computer-Integrated Technologies and Robotics; 175 – Metrology and information-measuring technique; 176 – Micro- and Nanosystem Technology.

Website: rt.nure.ua

Registration certificate KV № 12098-969 PR dated 14. 12. 2006.

The authors are responsible for the content of the article.

Editorial Team

S.O. Sheiko, PhD, Assoc. prof., NURE, Ukraine (Chief Editor)
O.G. Avrunin, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine
D.V. Ageiev, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine
V.M. Bezruk, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine
I.M. Bondarenko, *Dr. Sc. (Phys.-Math.), prof.*, NURE, Ukraine
I.D. Gorbenko, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, KhNU V. N. Karazin, Ukraine
D.V. Gretsikh, *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. prof.*, NURE, Ukraine
K.Yu. Dergachov, PhD, Senior Researcher, Sciences, prof., NAU «KhAI», Ukraine
V.O. Doroshenko, *Dr. Sc. (Phys.-Math.), prof.*, NURE, Ukraine
I.P. Zakharov, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine
V.M. Kartashov, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine
O.O. Konovalenko, *Dr. Sc. (Phys.-Math.), prof.*, Academician of NASU, IRA NASU, Ukraine
Ye.V. Kotukh, PhD, Assoc. prof., Dnipro UT, Ukraine
A.S. Kulik, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NAU «KhAI», Ukraine
A.I. Luchaninov, *Dr. Sc. (Phys.-Math.), prof.*, NURE, Ukraine
K.M. Muzyka, *Dr. Sc. (Tech.), Senior Researcher*, NURE, Ukraine
E.M. Odarenko, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine
O.G. Pashchenko, PhD, Assoc. prof., NURE, Ukraine
I.V. Svyd, *PhD, Assoc. prof.*, PNU, Ukraine
V.V. Semenets, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine
S.I. Tarapov, *Dr. Sc. (Phys.-Math.), prof.*, member-cor. NASU, IRE NASU, Ukraine
P.L. Tokarsky, *Dr. Sc. (Phys.-Math.), prof.*, IRA NASU, Ukraine
O.I. Filipenko, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine
H.Z. Khalimov, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine
O.M. Tsybal, *Dr. Sc. (Tech.), prof.*, NURE, Ukraine

Members of the editorial board of foreign scientific institutions and educational institutions

Boris Chichkov (*Germany*), Marianna Ivashina (*Sweden*), Konstyantyn Markov (*Germany*), Georgiy Sevskiy (*Germany*), Larysa Titarenko (*Poland*), Vitaliy Zhurbenko (*Denmark*), Irena Vorgul (*United Kingdom*), Waldemar Wójcik (*Польша*).

Responsible for the issue: *I.V. Svyd, PhD, Assoc. prof., I.D. Gorbenko, Dr. Sc. (Tech.), prof.*

Technical Secretary: *O.S. Polyakova.*

Recommended by the Scientific and Technical Council of Kharkiv National University of Radio Electronics, protocol № 13/6 dated 26.12.2024.

Address of the editorial board: Kharkiv National University of Radio Electronics (NURE), ave. Nauky, 14, Kharkiv, 61166, tel. (0572) 7021-397.

The use of materials is possible only with the consent of the editorial board.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

РАДІОТЕХНІКА

**Всеукраїнський
міжвідомчий науково-технічний збірник**

ISSN 0485-8972
eISSN 2786-5525

Засновано в 1965 р.

В И П У С К 2 1 9

Харків
Харківський національний
університет радіоелектроніки
2024

УДК 621.3

Збірник включено до Переліку наукових фахових видань України, категорія "Б", технічні та фізико-математичні науки (затверджено наказами МОНУ від 17.03.2020 № 409; від 02.07.2020 № 886; від 24.09.2020 № 1188) за спеціальностями: 105 – Прикладна фізика та наноматеріали; 125 – Кібербезпека та захист інформації; 163 – Біомедична інженерія; 171 – Електроніка; 172 – Електронні комунікації та радіотехніка; 173 – Авіоніка; 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка; 175 – Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології; 176 – Мікро- та наносистемна техніка.

Сайт: rt.nure.ua

Реєстраційне свідоцтво КВ № 12098-969 ПР від 14. 12. 2006.

За зміст статті відповідальні автори.

Редакційна колегія

С.О. Шейко, *к.т.н., доц., ХНУРЕ, Україна (головний редактор)*
О.Г. Аврунін, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*
Д.В. Агеев, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*
В.М. Безрук, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*
І.М. Бондаренко, *д.ф.-м.н., проф., ХНУРЕ, Україна*
І.Д. Горбенко, *д.т.н., проф., ХНУ ім. В.Н. Каразіна, Україна*
Д.В. Грецьких, *д.т.н., доц., ХНУРЕ, Україна*
К.Ю. Дергачов, *к.т.н., с.н.с., НАУ ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Україна*
В.О. Дорошенко, *д.ф.-м.н., проф., ХНУРЕ, Україна*
І.П. Захаров, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*
В.М. Карташов, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*
А.А. Коноваленко, *д.ф.-м.н., академік НАНУ, РІАН, Україна*
Є.В. Котух, *к.т.н., доц., НТУ «Дніпровська Політехніка», Україна*
А.С. Кулік, *д.т.н., проф., НАУ ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Україна*
А.І. Лучанінов, *д.ф.-м.н., проф., ХНУРЕ, Україна*
К.М. Музика, *д.т.н., с.н.с., ХНУРЕ, Україна*
Є.М. Одаренко, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*
О.Г. Пащенко, *к.ф.-м.н., доц., ХНУРЕ, Україна*
І.В. Свид, *к.т.н., доц., ПНУ, Україна*
В.В. Семенець, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*
С.І. Тарапов, *д.ф.-м.н., проф., член-кор. НАНУ, ІРЕ НАНУ, Україна*
П.Л. Токарський, *д.ф.-м.н., проф., РІАН, Україна*
О.І. Филипенко, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*
Г.З. Халімов, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*
О.М. Цимбал, *д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна*

Міжнародна редакційна колегія

Boris Chichkov (*Німеччина*), Marianna Ivashina (*Швеція*), Konstyantyn Markov (*Німеччина*), Georgiy Sevskiy (*Німеччина*), Larysa Titarenko (*Польща*), Vitaliy Zhurbenko (*Данія*), Irena Vorgul (*United Kingdom*), Waldemar Wójcik (*Польща*).

Відповідальні за випуск: *І.В. Свид, канд. техн. наук, доц., І.Д. Горбенко, д-р техн. наук, проф.*

Технічний секретар: *О.С. Полякова.*

Рекомендовано Науково-технічною радою Харківського національного університету радіоелектроніки, протокол № 13/6 від 26.12.2024.

Адреса редакційної колегії: Харківський національний університет радіоелектроніки (ХНУРЕ), просп. Науки, 14, Харків, 61166, тел. (0572) 7021-397.

Використання матеріалів можливе лише за згодою редколегії.

CONTENT

SYSTEMS AND METHODS OF INFORMATION PROTECTION

<i>T.I. Korobeinikova, A.B. Yamnych</i> Information Security Risk Assessment for Personnel During Access Segregation to Company Resources	7
<i>D.Yu. Golubnychiy, O.S. Holovchenko</i> Application of rank approach algorithms in planning task distribution in multiprocessor systems	16
<i>I.V. Oleshko, K.O. Papazov</i> Ensuring user anonymity in online surveys	28
<i>Y. Kotukh, G. Khalimov, I. Dzhura, H. Hivrenko</i> Application of the LINE encryption scheme in the key encapsulation mechanism for the authentication protocol in 5G networks	36

AUTOMATION AND ROBOTICS

<i>O.V. Zubkov, O.C. Yakovenko, C.V. Starokozhev, M.V. Skorbatuk</i> Development and study of the algorithm for automated recognition of gas meter readings	46
<i>A.A. Sokolov, O.G. Avrunin</i> Using the ARCore library to visualize keypoint clouds in navigation systems	53

RADIO ELECTRONIC SYSTEMS

<i>A.P. Shamrai, I.E. Kondrashov</i> Analysis of sounding signals of radioacoustic sounding systems of the atmosphere in the functional space	59
<i>V.M. Kantsedal</i> Improving the level of formalization of management processes at the main stages of electronic countermeasures against small unmanned aircraft systems to obtain conflict advantages	68
<i>M.V. Buhaiov</i> Mathematical modelling of unmanned aerial vehicle based wideband spectrum sensing	82

PHYSICS OF DEVICES, ELEMENTS AND SYSTEMS

<i>V.M. Borshchov, O.M. Listratenko, M.A. Protsenko, I.T. Tymchuk, O.V. Kravchenko, K.G. Bilousov, I.T. Perekopskyi</i> New approaches to creating ultralight solar arrays for ultrasmall spacecrafts	92
<i>O.V. Kazanko, O.Ye Penkina</i> Study of Flocke-Bloch waves depending on the spectral parameter for a one-dimensional photonic crystal	104

ELECTRONIC COMMUNICATIONS

<i>V.V. Dovhij, A.I. Terletsky, V.M. Hryha, I.V. Svyd</i> Analysis of digital interfaces data transmission in communication channels of computer systems	112
--	-----

RELATED PROBLEMS OF RADIO ENGINEERING

<i>A.V. Biziuk, N.G. Zmiivska</i> Directions for implementing the graphic style of the Armed Forces of Ukraine in the design of an electronic multimedia training manual on tactical training	124
<i>A. Paleyev, V. Kotukh, Y. Husieva, K. Paleyeva</i> On the issue of substantiating mathematical models of technical and economic indicators of gas distribution systems under conditions of uncertainty	131

ABSTRACTS	138
-----------	-----

ЗМІСТ

СИСТЕМИ І МЕТОДИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ

<i>Т.І. Коробейнікова, А.Б. Ямнич</i> Оцінювання ризиків інформаційної безпеки для персоналу під час розмежування доступу до ресурсів компанії	7
<i>Д.Ю. Голубничий, О.С. Головченко</i> Застосування алгоритмів рангового підходу при плануванні розподілу задач в багатопроцесорних системах	16
<i>І.В. Олешко, К.О. Папазов</i> Забезпечення анонімності користувачів при проведенні онлайн-опитувань	28
<i>Є.В. Котух, Г.З. Халімов, І.Є. Джура, Г.О. Хівренко</i> Застосування схеми шифрування ІІпе в механізмі інкапсуляції ключів для протоколу автентифікації в мережах 5G	36

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА РОБОТОТЕХНІКА

<i>О.В. Зубков, О.С. Яковенко, С.В. Старокожев, М.В. Скорбатюк</i> Розробка та дослідження алгоритму автоматизованого розпізнавання показань газових лічильників	46
<i>А.А. Соколов, О.Г. Аврун</i> Використання бібліотеки ARCore для візуалізації хмари ключових точок у навігаційних системах	53

РАДІОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ

<i>А.П. Шамрай, І.Є. Кондрашов</i> Аналіз зондувальних сигналів систем радіоакустичного зондування атмосфери в функціональному просторі	59
<i>В.М. Канцедал</i> Поліпшення рівня формалізації процесів управління на основних етапах радіоелектронної протидії малій безпілотній авіаційній системі для отримання конфліктних переваг	68
<i>М.В. Бугайов</i> Математична модель прийнятого сигналу панорамним засобом радіомоніторингу на безпілотному літальному апараті	82

ФІЗИКА ПРИЛАДІВ, ЕЛЕМЕНТІВ І СИСТЕМ

<i>В.М. Борцов, О.М. Лістратенко, М.А. Проценко, І.Т. Тимчук, О.В. Кравченко, К.Г. Білоусов, І.Т. Перекопський</i> Нові підходи до створення надлегких сонячних батарей для надмалих космічних апаратів	92
<i>О.В. Казанко, О.Є. Пенкіна</i> Дослідження Флоке-Блохівських хвиль у залежності від спектрального параметра для одновимірного фотонного кристала	104

ЕЛЕКТРОННІ КОМУНІКАЦІЇ

<i>В.В. Довгий, А.І. Терлецький, В.М. Грига, І.В. Свид</i> Аналіз цифрових інтерфейсів передачі даних у каналах зв'язку комп'ютерних систем	112
---	-----

СУМІЖНІ ПРОБЛЕМИ РАДІОТЕХНІКИ

<i>А.В. Бізюк, Н.Г. Зміївська</i> Напрями впровадження графічного стилю Збройних Сил України в дизайн електронного мультимедійного навчального посібника з тактичної підготовки.	124
<i>А.В. Палєєв, В.Г. Котух, Ю.Ю. Гусєва, К.М. Палєєва</i> До питання обґрунтування математичних моделей техніко-економічних показників газорозподільних систем в умовах невизначеності	131

РЕФЕРАТИ	138
----------	-----

SYSTEMS AND METHODS OF INFORMATION PROTECTION СИСТЕМИ І МЕТОДИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ

УДК 004.056.5:005.8

DOI:10.30837/rt.2024.4.219.01

Т.І. КОРОБЕЙНИКОВА, канд. техн. наук, А.Б. ЯМНИЧ

ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ДЛЯ ПЕРСОНАЛУ ПІД ЧАС РОЗМЕЖУВАННЯ ДОСТУПУ ДО РЕСУРСІВ КОМПАНІЇ

Вступ

Персонал компанії є одним із критичних активів і водночас однією з найслабших ланок її інформаційної безпеки (ІБ), тому у сучасних установах на регулярній основі відбувається його аудит з метою оцінювання ризиків безпеки [1–3]. Впровадження оцінювання ризиків у галузі інформаційної безпеки компаній уже давно стало актуальним предметом наукових праць вітчизняних та закордонних дослідників, які наголошують на важливості людського фактора в безпеці функціонування інформаційних систем [4–5]. Як зазначають автори одного з найактуальніших українських досліджень впливу людини на інформаційну безпеку, «на тепер рівень інформаційних атак, які включають людський чинник, значно збільшується» [2]. Нині найбажанішим здобутком від атак на інформаційні системи компанії є персональні дані її працівників, облікові записи користувачів робочих станцій, комерційна таємниця, бази даних, внутрішня переписка, дані банківських рахунків тощо. З метою попередження атак та виявлення потенційних загроз для інформаційних ресурсів компанії потрібно навчитися застосовувати різноманітні методи оцінювання вразливостей у поєднанні з міжнародними практиками та стандартами управління ІБ [6]. Одним із ключових факторів у контексті ІБ компанії, що потребує оцінювання, є ризики інформаційної безпеки для персоналу під час доступу до ресурсів компанії. З метою надання такої оцінки було вирішено модифікувати відомий технологічний ланцюжок оцінювання ризиків мережевої безпеки [7] і на його основі запропонувати послідовність виконання процесів, що є складовими для оцінювання ризиків ІБ для персоналу під час доступу до ресурсів компанії. Високий рівень ІБ є необхідною умовою для створення та підтримання високої репутації компанії. Належний рівень захисту інформаційних ресурсів підвищує привабливість компанії не тільки для клієнтів, але й для її працівників, що може позитивно вплинути на фінансові результати та подальший розвиток [8–9].

Мета дослідження – вдосконалення підходів до оцінювання ризиків інформаційної безпеки для персоналу компанії під час розмежування доступу до корпоративних інформаційних ресурсів за рахунок розроблення та впровадження модифікованої послідовності процесів, яка враховує специфіку людського чинника і сприяє мінімізації загроз, що виникають через помилки та зловмисні дії персоналу.

1. Аналіз останніх джерел в галузі ІБ в контексті діяльності компанії

Питання взаємозв'язку персоналу та безпеки інформаційних ресурсів компанії розглядали багато українських та закордонних дослідників. Ця проблема охоплювала різні аспекти, включаючи управління персоналом, контроль доступу до інформації та вдосконалення навичок співробітників. Серед українських учених, які досліджували цю тему, варто відзначити Г. Смоквіну, О. Янковську, Ю. Якименко, Т. Мужанову, С. Легомінову, О. Кір'яна, Д. Торяника, Н. Ягнеш, В. Тітову, Ю. Кльоца, В. Волинця, Н. Петляк, М. Огородник та інших.

Питання інформаційної безпеки компанії як процес, що включає визначення потреби в кількості та якості персоналу, його залучення та ефективну розстановку, прогнозування структури, а також оцінювання результатів діяльності й удосконалення професійних знань і навичок, дослідили Г. Смоквіна та О. Янковська [10].

Система управління інформаційною безпекою, яку описали Ю. Якименко, Т. Мужанова та С. Легомінова, представлена як комплекс взаємопов'язаних процесів. Вона охоплює управління персоналом, засобами захисту, ризиками, інцидентами та ресурсами, що дозволяє забезпечити повний цикл кібербезпеки на підприємстві [11]. Важливість освітніх процесів, що спрямовані на підвищення обізнаності персоналу щодо основ інформаційної безпеки, підкреслили О. Кір'ян, Д. Торяник та Н. Ягнеша. Їхні рекомендації включають навчання працівників протидії можливим ризикам у кіберпросторі, що сприяє адаптації персоналу до сучасних вимог інформаційної безпеки [12].

У дослідженні, яке виконали В. Тітова, Ю. Кльоц, В. Волинець, Н. Петляк та М. Огородник, було наголошено на необхідності формування внутрішніх правил і норм, які регламентують поведінку співробітників для забезпечення інформаційної безпеки. Також у роботі описано основні засоби захисту інформації, що є критичними для підвищення рівня безпеки в організації [13].

Серед іноземних дослідників, що розглядали питання взаємозв'язку персоналу та безпеки інформаційних ресурсів компанії, можна виокремити М. Karjalainen, M. Siponen, S. Sarker, K. Khando, S. Gao, S. M. Islam, A. Salman, S. Sharma, M. Warkentin та інших.

У дослідженні, проведеному М. Karjalainen, M. Siponen та S. Sarker, розроблено концептуальні підходи до покращення інформаційної безпеки компанії через визначення основних етапів управління цим процесом. Розроблені етапи можуть значно підвищити ефективність навчання персоналу основам інформаційної безпеки [14].

Дослідження К. Khando, S. Gao, S. Islam та А. Salman зосереджене на вивченні гейміфікації та теоретичних моделей, які використовуються для навчання персоналу основам інформаційної безпеки. Дослідники з'ясували, що ці методи широко використовуються у приватних і державних організаціях, тоді як конструктивістський підхід та методи виявлення порушень здебільшого застосовуються в приватних структурах [15].

S. Sharma та M. Warkentin підтвердили, що рівень організаційної підтримки та прихильності значно впливає на поведінкові наміри персоналу щодо використання інформаційних ресурсів компанії, що є особливо відчутним серед постійних працівників, і забезпечує загальний рівень безпеки [16].

Проаналізувавши актуальні наукові джерела у відкритому доступі, можна дійти висновку, що тема зв'язку персоналу та безпеки інформаційних ресурсів компанії в контексті його оцінювання є актуальною, оскільки викликає широкий інтерес у багатьох вітчизняних і закордонних дослідників.

Проте питання визначення послідовності виконання процесів, що є складниками для оцінювання ризиків інформаційної безпеки для персоналу під час доступу до ресурсів компанії, потребує більш ґрунтовної наукової уваги через перманентне збільшення небезпечності цих ризиків в умовах загострення ситуації з інформаційною безпекою у всьому світі.

2. Технологічна послідовність процесів оцінювання ризиків ІБ для персоналу під час доступу до ресурсів компанії

Інформаційна безпека компанії охоплює інструменти та процеси, які вона використовує для захисту інформації від несанкціонованих дій, тобто попереджає доступ неавторизованих осіб до ділової чи особистої інформації.

Приблизно два десятиліття тому, паралельно з розвитком фундаментальних теорій і методів оцінки та управління ризиками мережевої безпеки, з'явився напрям оцінки та управління ними [17–18]. Хоча ці фундаментальні принципи і методології залишаються невід'ємними, за останнє десятиліття з'явилися значні теоретичні досягнення і практичні моделі. На рис. 1 показано технологічний ланцюжок, що регулює ризики мережевої безпеки [3, 7], який охоплює такі процеси, як 1) збір активів, 2) формування переліку активів, 3) аналіз активів, 4) аналіз інфраструктури, 5) порівняльний аналіз інфраструктури, 6) аналіз та оцінка

ризиків, 7) розробка рекомендацій, 8) впровадження засобів контролю, 9) огляд та повторний аудит.

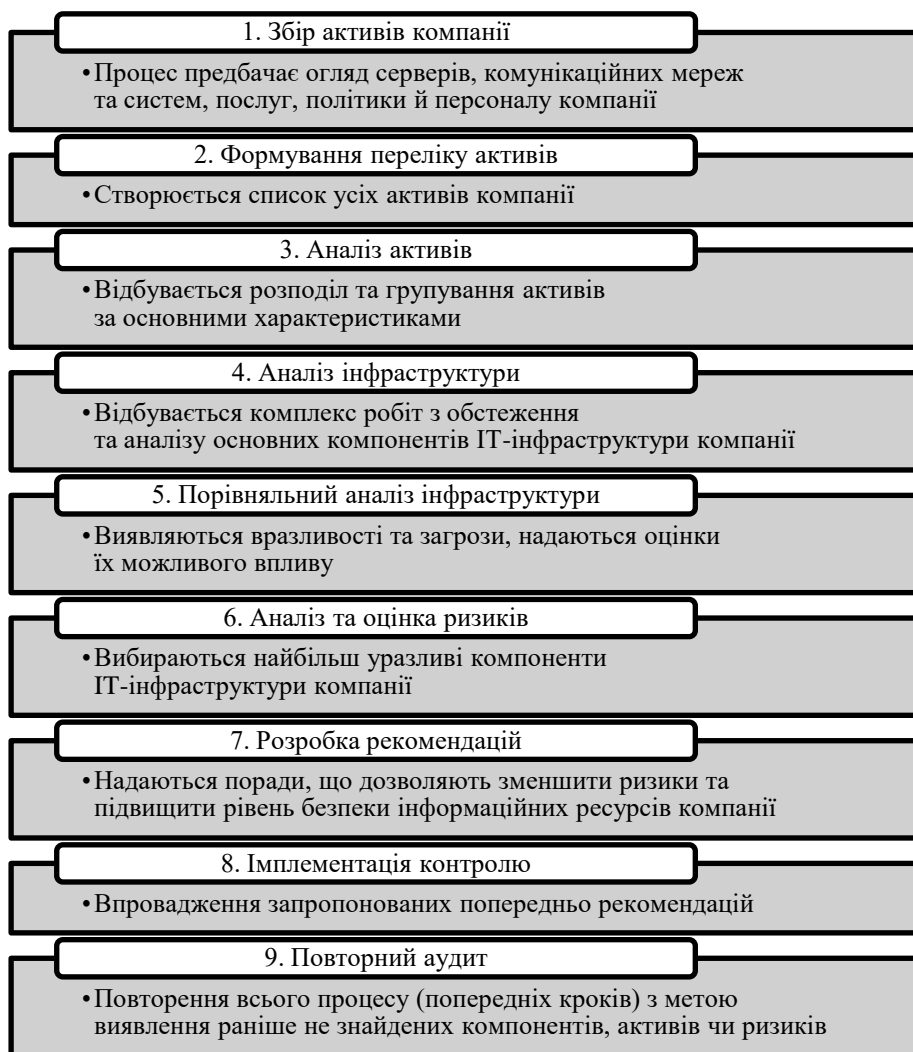


Рис. 1. Технологічний ланцюжок визначення ризиків мережевої безпеки

Збір активів передбачає отримання звітів технічних працівників та кожного окремого працівника компанії, де повинна міститися основна інформація про стан обладнання та характеристики персоналу компанії. Результатом збору активів є формування переліку активів, що відображені в електронному вигляді та зберігається у базі даних. Активи групуються на основі їх стану чи ключових значень, що і є наступним кроком в процесі оцінювання ризиків інформаційної безпеки. Аналіз інфраструктури компанії відбувається шляхом перевірки стану комп'ютерів, серверів та іншого мережевого обладнання. Метою цього аналізу є виявлення найбільш слабких компонентів, до яких зловмисники можуть застосувати шкідливе програмне забезпечення. Порівняльний аналіз інфраструктури компанії проходить перевірку відповідності міжнародним стандартам та вимогам. Під час аналізу потенційних ризиків відбувається оцінка можливого впливу злочинців на інформаційні ресурси компанії. Аналіз дозволяє вибирати адекватні захисні заходи для тих систем і процесів, в яких вони необхідні. Розробка рекомендацій та їх імплементация. Деякі з рекомендацій можуть бути відхилені керівництвом, якщо вважатимуться непотрібними чи дуже затратними до виконання. Результатами рекомендацій є створення контролів. Контролі впроваджуються технічними спеціалістами на місцях, а інформація про це обмежено (частина може зберігатися в таємниці) доноситься до всього іншого персоналу. Останнім кроком процесу оцінювання ризиків ІБ компанії є повторний аудит, що означає виконання всіх кроків знову з метою виявлення

раніше не знайдених компонентів інфраструктури, активів чи потенційних ризиків. Це дозволяє постійно підвищувати рівень безпеки інформаційних ресурсів компанії, бо сам процес оцінювання ризиків інформаційної безпеки є перманентним та безперервним.

Для вирішення задачі оцінювання ризиків інформаційної безпеки для персоналу компанії під час розмежування доступу до корпоративних інформаційних ресурсів пропонується модифікований технологічний ланцюжок процесів оцінювання ризиків інформаційної безпеки для персоналу під час доступу до ресурсів компанії, який складається з дев'яти основних кроків, пояснення яких наведено на рис. 2.

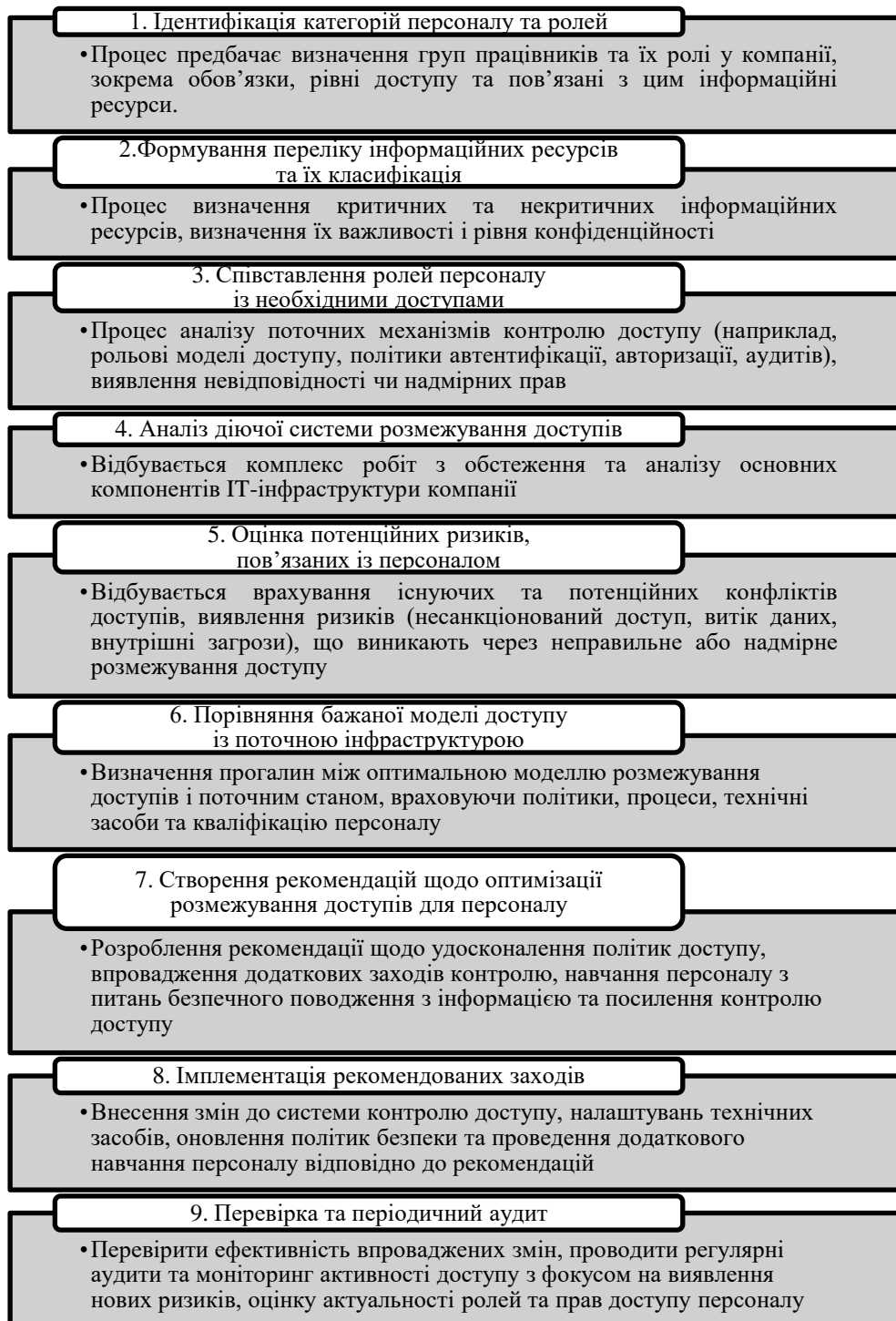


Рис. 2. Модифікований технологічний ланцюжок процесів оцінювання ризиків інформаційної безпеки для персоналу під час доступу до ресурсів компанії

1) Ідентифікація категорій персоналу та ролей. Завдання етапу: визначити, які категорії працівників (адміністратори, технічні фахівці, менеджери, звичайні користувачі, гості тощо) існують у межах компанії; призначити конкретні ролі, що відображають рівень та тип доступу до інформаційних ресурсів:

- аналіз внутрішніх процесів: провести опитування, інтерв'ю або анкетування з метою з'ясування реального функціоналу кожної ролі;
- детальне документування: чітко описати повноваження й обов'язки кожної категорії персоналу, щоб уникнути перетинань та суперечностей;
- регулярний перегляд: періодично переглядати розподіл ролей у зв'язку зі змінами в організаційній структурі чи процесах.

2) Формування переліку інформаційних ресурсів та їх класифікація. Завдання етапу: визначити, якими інформаційними ресурсами (бази даних, електронна пошта, внутрішні сховища, CRM-системи, комерційна таємниця тощо) володіє компанія; провести їх класифікацію за критеріями критичності, конфіденційності й впливу на бізнес-процеси:

- стандартизовані методики класифікації: використовувати міжнародно визнані підходи (iso 27001, nist тощо), щоб систематизувати дані;
- повний облік ресурсів: залучити всі підрозділи компанії, аби жоден ресурс не залишився поза увагою;
- електронні реєстри: створити централізований реєстр (базу даних) зі зручною пошуковою та звітною системами для оперативного доступу та оновлення даних.

3) Співставлення ролей персоналу із необхідними доступами. Завдання етапу: визначити, які ресурси є необхідними для виконання конкретних ролей та завдань у компанії; забезпечити, щоб рівень доступу відповідав посадовим обов'язкам та не перевищував їх:

- аналіз робочих процесів: чітко відстежити, якими системами та документами користується кожна роль у своїй щоденній діяльності;
- принцип мінімальних привілеїв (Least Privilege): надавати кожному співробітнику найменший обсяг доступів, необхідних для виконання роботи;
- політики Role-Based Access Control (RBAC): використовувати рольовий підхід до керування доступом, щоб легко додавати/змінювати або вилучати доступ для груп працівників, а не для кожної особи окремо [19].

4) Аналіз діючої системи розмежування доступів. Завдання етапу: вивчити, яким чином реалізовано надання, перевірку та відкликання доступу до інформаційних ресурсів; зрозуміти сильні сторони та вразливі місця існуючої системи:

- аудит політик та процедур: перевірити поточні інструкції й регламенти, щоби виявити, як вони реалізуються на практиці;
- використання тестових сценаріїв: змодельовати практичні кейси (наприклад, звільнення співробітника, зміну посади чи надання доступу новому відділу), щоби виявити «вузькі місця» в розмежуванні доступу;
- робота з логами та журналами подій: аналізувати журнали аутентифікації, змін паролів, внесення змін до ролей, щоби виявити потенційні порушення або пропуски в безпеці.

5) Оцінка потенційних ризиків, пов'язаних із персоналом. Завдання етапу: виявити, як дії чи бездіяльність працівників можуть загрожувати інформаційним ресурсам (наприклад, фішингові атаки, слабкі паролі, людські помилки, внутрішні зловмисники); оцінити рівень цих ризиків із точки зору ймовірності та впливу:

- проактивні методи оцінки: використовувати опитування та психологічні тести, щоби виявити «зони ризику» в поведінці та знаннях співробітників;
- інструменти для аналізу ризиків: застосувати відомі методології (наприклад, OCTAVE, CORAS, ISO 27005), щоби виміряти й ранжувати загрози;
- систематичне навчання: проводити тренінги з кібергігієни, навчати правил безпечної поведінки та реагування на можливі атаки (фішинг, соціальна інженерія тощо).

б) Порівняння бажаної моделі доступу із поточною інфраструктурою. Завдання етапу: співставити «цільову» модель розмежування доступів із реальною інфраструктурою й політиками безпеки, які діють у компанії; зрозуміти, які зміни необхідні для досягнення бажаного рівня безпеки:

- використання референтних моделей: орієнтуватися на міжнародні стандарти та еталонні системи (COBIT, ITIL, Zero Trust тощо);
- пріоритезація змін: визначити, які зони найбільш критичні й потребують негайної уваги, а які можна впроваджувати поетапно;
- оцінка вартості впровадження: поєднати безпекові переваги із загальними бізнес-цільями, щоб уникнути надмірних або неоправданих витрат.

7) Створення рекомендацій щодо оптимізації розмежування доступів для персоналу. Завдання етапу: розробити набір конкретних рекомендацій або план заходів, які покращать існуючу систему доступу з урахуванням реалій компанії; врахувати технічні, організаційні та людські аспекти впровадження:

- комплексний підхід: розглянути не лише технічні рішення (ПЗ, апаратне забезпечення), а й організаційні (процедури, політики, інструкції) і кадрові заходи (навчання, відповідальність);
- гнучкість рекомендацій: формувати пропозиції з урахуванням розміру компанії, наявного бюджету та специфіки галузі;
- залучення керівництва: представити рекомендації мовою бізнес-переваг, щоб отримати підтримку й необхідні ресурси для реалізації.

8) Імплементация рекомендованих заходів. Завдання етапу: перекласти рекомендації у практичні дії: перепроєктувати інфраструктуру, оновити політики доступу, впровадити нові процедури тощо; здійснити контрольоване впровадження з урахуванням можливих ризиків змін:

- покроковий план реалізації: розділити процес на етапи, прописати терміни, відповідальних осіб та очікувані результати;
- пілотне впровадження: випробувати зміни на обмеженій групі (відділі) перед масштабним розгортанням, щоб переконатися в їх коректності та ефективності;
- система індикаторів: підготувати показники (KPI, KRI) для об'єктивної оцінки успішності імплементации.

9) Перевірка та періодичний аудит. Завдання етапу: здійснити моніторинг і періодичний аудит оновленої системи розмежування доступів, щоб оперативно виявляти вразливості; забезпечити безперервний процес удосконалення безпеки:

- регулярні перевірки: проводити планові та позапланові аудити (внутрішні та зовнішні), щоб тримати систему під постійним контролем;
- автоматизовані засоби моніторингу: використовувати інструменти IDS/IPS, системи SIEM, логування та аналіз журналів подій для постійного відстеження підозрілої активності;
- зворотний зв'язок від користувачів: створити канал комунікації, де співробітники зможуть повідомляти про потенційні проблеми або незручності, пов'язані з доступом.

Для вирішення задачі оцінювання ризиків інформаційної безпеки для персоналу компанії під час розмежування доступу до корпоративних інформаційних ресурсів пропонується комплексна модель оцінювання ризиків інформаційної безпеки для персоналу під час розмежування доступу до корпоративних ресурсів (рис. 3), яка враховує специфіку людського чинника і сприяє мінімізації загроз, що виникають через помилки та зловмисні дії персоналу.



Рис. 3. Комплексна модель оцінювання ризиків інформаційної безпеки для персоналу під час розмежування доступу до корпоративних ресурсів

3. Інформаційна безпека у контексті профілювання персоналу

Інформаційна безпека передбачає всі процеси щодо інформації: її перевірку, модифікацію, записування, будь-яке порушення чи знищення і тісно пов'язана із системами управління ризиками та правовими нормами [18]. Основними принципами інформаційної безпеки та технічного захисту інформації компанії є «тріада CIA» (Confidentiality, Integrity, Availability). Сутністю цих трьох принципів інформаційної безпеки та технічного захисту інформації компанії є:

1. Конфіденційність означає певні заходи, що призначені для запобігання несанкціонованому розголошенню інформації. Метою принципу конфіденційності є збереження особистої інформації, тобто бачити її чи мати до неї доступ можуть тільки ті особи, які нею володіють або потребують її для виконання своїх посадових обов'язків.
2. Принцип цілісності передбачає захист від несанкціонованих змін даних, зокрема додавання, видалення, модифікація тощо, тобто гарантує, що дані є точними й надійними і не змінюються помилково чи зловмисно.
3. Доступність – це захист здатності системи робити дані повністю досяжними для авторизованих користувачів у будь-який час. Іноді через погіршення роботи сервера трапляються випадки відмови від обслуговування, тому мета принципу доступності – зробити технологічну інфраструктуру, програми та дані доступними, коли вони потрібні для робочого процесу або для клієнтів компанії [20–21].

Але, оскільки працівник як актив компанії є унікальним, бо має власний набір навичок та вмінь, переваг і недоліків, то він не може прямо порівнюватись з іншими активами компанії. Сума різноманітних факторів кожного працівника формує його власний профіль [14]. Профілювання надає можливість визначити різницю відповідності профілів працівників до критеріїв компанії та порівнювати їх між собою.

У контексті захисту інформаційних ресурсів компанії користувачів розділяють на групи з різними правами доступу (ці дані також є частиною профілю працівника):

- адміністратори мережі – можуть створювати та управляти політикою інформаційної безпеки, мають дозвіл на зміну глобальних налаштувань мережі;

- технічні працівники (інженери) – проводять регулярне обслуговування ІТ-інфраструктури компанії (техніки, обладнання, мереж);
- інший персонал – використовують інформаційні ресурси для виконання необхідних завдань, тому мають усі права стандартного користувача (профіль з обмеженим доступом);
- гостьовий профіль – обмежений обліковий запис для покупця чи користувача послуг компанії.

На основі створення цих груп користувачів здійснюється політика розмежування доступу. Весь персонал компанії, що не є адміністраторами чи технічними спеціалістами, зазвичай можуть виконувати всі необхідні операції з інформаційними ресурсами, крім таких, як: завантаження робочих файлів; створення власних груп користувачів чи зміна вже наявних; зміна налаштувань серверів та мережі; підключення нової ІТ-інфраструктури; самостійне встановлення програмного забезпечення; підключення зовнішнього обладнання.

Більшість моделей розмежування прав доступу до інформаційних ресурсів побудовано на основі методу паролної автентифікації. Вони не вимагають залучення великого обсягу апаратних та програмних компонентів, але часто можуть мати сумнівну надійність. Відомі також методи автентифікації, які передбачають використання інших засобів, котрі надають кращий рівень захисту, ніж автентифікація за допомогою паролю [15].

Питання хешування має прямий зв'язок із процесом автентифікації користувачів, оскільки за його допомогою в деяких моделях розмежування прав доступу відбувається одночасна автентифікація користувача та самого пристрою (робочої станції) перед наданням доступу до необхідного інформаційного ресурсу компанії.

Висновки

Розглянуто взаємозв'язок між персоналом компанії та рівнем захищеності її інформаційних ресурсів, проаналізовано існуючі підходи до оцінювання ризиків інформаційної безпеки. Особливу увагу приділено комплексу заходів, спрямованих на формування політики розмежування доступу, що враховує специфіку людського чинника.

Досягнуто мети, яка передбачала вдосконалення підходів до оцінювання ризиків інформаційної безпеки для персоналу компанії під час розмежування доступу до корпоративних інформаційних ресурсів за рахунок розроблення та впровадження модифікованої послідовності процесів, що мінімізує загрози, пов'язані з помилками та зловмисними діями працівників. Запропоновано технологічний ланцюжок, який містить дев'ять послідовних етапів оцінки ризиків, серед яких виокремлено ідентифікацію категорій персоналу й ролей, формування переліку інформаційних ресурсів та їх класифікацію, оцінку потенційних ризиків тощо.

Запропоновано комплексну модель оцінювання ризиків інформаційної безпеки для персоналу, що враховує унікальні характеристики працівників і дає змогу деталізувати політику доступу відповідно до профілю кожного користувача. Особливу увагу приділено профілюванню персоналу, методам автентифікації та механізмам перевірки робочих станцій. Виокремлено практичні рекомендації щодо організації періодичного аудиту, навчання персоналу, впровадження проактивних методів аналізу ризиків та гейміфікованих підходів, що підсилюють рівень захисту.

Отже, використання описаного підходу дає можливість комплексно оцінити й контролювати ризики інформаційної безпеки, пов'язані з людським чинником, і сприяє підвищенню загального рівня захисту корпоративних ресурсів та оптимізації процесів розмежування доступу в компанії.

Список літератури:

1. N. Kaloudi and J. Li. AST-SafeSec: Adaptive Stress Testing for Safety and Security Co-Analysis of Cyber-Physical Systems // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 2023. Vol. 18. pp. 5567–5579. doi: 10.1109/TIFS.2023.3309160.

2. «Ukraine - Data Protection Overview.» DataGuidance, 12 Nov. 2024, www.dataguidance.com/notes/ukraine-data-protection-overview.
3. Korobeinikova T., Tachenko I., Romanyuk O., Romanyuk S., Stakhov O. and Reyda O.. Assessing Network Security Risks: a Technological Chain Perspective // 14th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Ceske Budejovice, Czech Republic, 2024, pp. 565–570, doi: 10.1109/ACIT62333.2024.10712586.
4. Міщук Є., Іванов Р. (2024). Управління персоналом для забезпечення кадрової безпеки підприємства // Успіхи і досягнення у науці, 2024. № 6.
5. Корченко А. та ін. Метод формування параметрів та оцінювання загроз у соціотехнічних системах // Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. 2023. № 2. С. 3–11. Режим доступу: <https://doi.org/10.32782/IT/2023-2-1>.
6. Kurii Y. Opriskyu I. ISO 27001: аналіз змін та особливості відповідності новій версії стандарту // Електронне фахове наукове видання Кібербезпека: освіта, наука, техніка. 2023. 3(19). С. 46–55.
7. Korobeinikova T., Tachenko I., Chekhmestruk R., Mykhaylov P., Romanyuk O. and Romanyuk S. A General Method of Risk Estimation // 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). Wrocław, Poland, 2023, pp. 410–413. doi: 10.1109/ACIT58437.2023.10275626.
8. Воронкова В. Г., Нікітенко В. О. Цифрова трансформація промислового підприємства : наук.-метод. посіб. Запоріжжя : ЗНУ, 2023. 158 с.
9. Мазник Л. В., Драган О. І. Інформаційна безпека організації як фактор посилення бренду роботодавця // Київський економічний науковий журнал. 2023. № 1. С. 39–44. Режим доступу: <https://doi.org/10.32782/2786-765X/2023-1-5>.
10. Смоквіна Г., Янковська О. Кадрова безпека промислових підприємств: сутність, складові та заходи мінімізації загроз // Економічний журнал Одеського політехнічного університету. 2019. Вип. 7. № 1. С. 38–45. Режим доступу: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3402729>.
11. Якименко Ю., Мужанова Т., Легомінова С. Системний аналіз технічних систем забезпечення інформаційної безпеки підприємств від компанії FireEye // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. 2021. Вип. 4. № 12. С. 36–50. Режим доступу: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2021.12.3650>.
12. Кір'ян О., Торяник Д., Ягнеша Н. Кадрова складова інформаційної безпеки підприємства // Адаптивне управління: теорія і практика. Сер. Економіка. 2024. Вип. 18. № 36. Режим доступу: [https://doi.org/10.33296/2707-0654-18\(36\)-12](https://doi.org/10.33296/2707-0654-18(36)-12).
13. Тітова В. та ін. Розроблення політики інформаційної безпеки приватного підприємства // Measuring and computing devices in technological processes. 2024. № 3. С. 79–83. Режим доступу: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-10>.
14. Karjalainen M., Siponen M., Sarker S. Toward a stage theory of the development of employees' information security behavior // Computers & Security. 2020. Vol. 93. P. 1–18. Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2020.101782>.
15. Khando K. et al. Enhancing employees information security awareness in private and public organisations: A systematic literature review // Computers & Security. 2021. Vol. 106. P. 1–22. Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2021.102267>.
16. Sharma S., Warkentin M. Do I really belong?: Impact of employment status on information security policy compliance // Computers & Security. 2019. Vol. 87. Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2018.09.005>.
17. ISO 27001 Requirements – Information Security Management // Sprinto, 2021. URL: <https://sprinto.com/blog/iso-27001-requirements/>.
18. “ISO/IEC 27701:2019.” ISO, 17 Oct. 2022, www.iso.org/standard/71670.html.
19. Ямнич А. Б. Модель контролю доступу персоналу до інформаційних ресурсів підприємств на основі RBAC та технології BLOCKCHAIN / А.Б. Ямнич, Т.І. Коробейнікова // Вісник Хмельницького нац. ун-ту. 2024. Т. 343, №6(1). С. 380–386.
20. Imperva. Information Security: The Ultimate Guide. Режим доступу: <https://www.imperva.com/learn/data-security/information-security-infosec/>
21. Секель А. Цілі інформаційної безпеки та їх значення. Режим доступу: <https://www.dqsglobal.com/uk-ua/navchajtesya/blog/cili-informacijnoyi-bezpeki-ta-yih-znachennya>.

Надійшла до редколегії 10.10.2024

Відомості про авторів:

Коробейнікова Тетяна Іванівна – канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри безпеки інформаційних технологій; Україна; e-mail: tetianakorobeinikova@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2487-8742>

Ямнич Андрій Богданович – аспірант кафедри безпеки інформаційних технологій; Національний університет «Львівська політехніка», Україна; e-mail: andrii.b.yamnych@lpnu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7226-1896>

Д.Ю. ГОЛУБНИЧИЙ, канд. техн. наук, О.С. ГОЛОВЧЕНКО

ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМІВ РАНГОВОГО ПІДХОДУ ПРИ ПЛАНУВАННІ РОЗПОДІЛУ ЗАДАЧ В БАГАТОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМАХ

Вступ

Класична комбінаторна задача про ранець є прикладом задачі цілочисельного лінійного програмування (ЦЛП) з булевими змінними (БЗ). Вона належить до широко відомих завдань дискретної оптимізації. Це завдання вперше було сформульовано Д. Данцигом у роботі і з того часу активно досліджується. Популярність класичної комбінаторної задачі про ранець викликана великою кількістю її додатків, оскільки багато які з реальних завдань описуються в рамках даної моделі. Однією із сфер застосування є розподіл завдань у багатопроцесорних системах та інформаційно-комунікаційних мережах.

Вирішення завдання оптимального планування розподілу задач у мережі з використанням моделі ЦЛП з БЗ полягає у знаходженні оптимального, відмовостійкого та ефективного способу розподілу ресурсів мережі. Даний підхід дозволяє враховувати як обмеженість ресурсів, так і необхідність забезпечення резервування для підвищення надійності роботи інформаційно-комунікаційних систем та мереж.

Зовнішня простота математичної моделі є оманливою, оскільки обчислювальну складність задачі про ранець характеризує результат про її NP-труднощі вже в одновимірному однокритеріальному випадку. Незважаючи на це, доведена NP-повнота задачі та її широка застосовуваність відкривають можливості для вивчення різних підходів до її вирішення, включаючи приблизні методи, націлені на пошук рішень, близьких до оптимальних.

Мета роботи – експериментальне порівняння властивостей наближених алгоритмів вирішення задачі цілочисельного лінійного програмування з булевими змінними, заснованих на ранговому підході, з метою їх подальшого застосування при розподілі задач в багатопроцесорних системах.

1. Основна частина

1.1. Формалізація планування розподілу задач в багатопроцесорних системах

Використання математичної моделі ЦЛП з БЗ для рішення задачі оптимального планування розподілу задач у мережі з відмовостійким функціонуванням має такі особливості [1 – 5]:

1. Бінарні змінні: у ЦЛП з БЗ рішення приймається у вигляді "0" або "1", що означає, чи включена певна задача або ресурс в планування. Це підходить для задач, де є вибір між кількома можливими альтернативами, наприклад, вибір маршруту для передачі даних чи визначення, чи використовувати певний вузол як резервний;

2. Моделювання резервування: БЗ дозволяють точно визначити в моделі резервування ресурсів у мережі;

3. Обмеження відмовостійкості: за допомогою використання лінійних обмежень в ЦЛП моделі враховуються вимоги до відмовостійкості, що дозволяє впроваджувати політику надмірності, яка необхідна для забезпечення стійкості до відмов;

4. Оптимізація використання ресурсів: у моделі ЦЛП задаються обмеження на ресурси, такі як пропускна здатність або кількість доступних вузлів. Це допомагає знайти оптимальний розподіл задач, щоб ефективно використовувати доступні ресурси та забезпечити балансування навантаження в мережі;

5. Моделювання розподілених задач: використання моделі ЦЛП з БЗ дозволяє оптимально визначити розподіл завдань по мережі, враховуючи фактори, такі як час виконання, затримка, а також доступність ресурсів. Використання БЗ полегшує опис сценаріїв, коли задача або призначена для виконання в конкретному вузлі, або не виконується;

6. Забезпечення QoS: модель ЦЛП можна розширити для включення вимог до якості обслуговування (QoS), використовуючи додаткові обмеження;

7. Комбінаторна складність: використання БЗ робить модель комбінаторною, що означає, що задача належить до класу NP-складних. Це значить, що розмірність задачі швидко зростає зі збільшенням кількості змінних, тому для великих мереж потрібні спеціалізовані методи рішення, такі як евристики або наближені алгоритми;

8. Відповідність цільовій функції: цільова функція в ЦЛП з БЗ може бути сформульована таким чином, щоб мінімізувати загальні витрати, час виконання або максимізувати мулевих стійкість мережі. Використання булевих змінних дозволяє включати до моделі додаткові критерії, що відображають вимоги щодо надійності та ефективності;

9. Аналіз надмірності: за допомогою БЗ можна моделювати надмірність у мережі, щоб визначити, які вузли чи канали можуть бути відключені без втрати працездатності. Це дозволяє знаходити мінімальну кількість необхідних резервних елементів;

10. Гнучкість у визначенні обмежень: БЗ полегшують включення різних додаткових обмежень до моделі, таких як вимоги до розміщення певних завдань в конкретних вузлах, забезпечення безпеки або визначення критичних елементів мережі, що повинні бути постійно активними.

Для оцінки процесу управління розподілом задач у мережі використовуються показники оцінки ефективності [6]:

- коефіцієнт функціональної потужності мережі:

$$E_v(S_v^i) = \sum_{i=1}^{n_v} \sum_{\mu=1}^{m_i} \beta_{\mu i}, \quad (1)$$

де n_v – загальна кількість ПМ у мережі в стані S_v ;

m_i – загальна кількість завдань, що здатний вирішувати i -й ПМ у стані S_v ;

$\beta_{\mu i}$ – вага μ -ї задачі i -го ПМ, що характеризує її важливість (пріоритет) для інформаційно-комунікаційних систем;

- сумарний час доступу до даних у мережі, який обумовлений розміщенням сегментів бази даних (БД) мережі на її фізичній структурі:

$$T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n K_j p_i \tau_{ij} x_{ij}, \quad (2)$$

де $\tau_{ij} = \frac{V_i^{(b)}}{\lambda_{ij}}$ – середній час вибору 1 кілобайта інформації з i -го фрагмента у вузлі j ;

λ_{ij} – коефіцієнт, який враховує швидкість вибору та обробки 1 мегабайта даних при звертанні до i -го фрагмента БД у j -му вузлі;

$V_i^{(b)}$ – ємність зовнішньої пам'яті, яка необхідна для розміщення i -го фрагмента БД;

p_i – характеристика частоти використання i -го фрагмента БД при функціонуванні системи управління базою даних (СУБД);

K_j – коефіцієнт, який показує швидкість доступу до даних на j -му вузлі мережі;

T_b – середній час відновлення мережі T_b ,

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо фрагмент БД з номером } i \text{ розміщений у } j\text{-му вузлі мережі;} \\ 0, & \text{у протилежному випадку;} \end{cases}; \quad (3)$$

Нехай маємо $M_i \ i = \overline{(1, n)}$ – управляючих процесорних модулів (ПМ), які служать для управління об'єктами O_e . Відмови системи зв'язку і відмови ПМ вважаємо незалежними. Під станом $s(t)$ на момент часу t маємо на увазі набір станів усіх модулів у цей момент, тобто $s(t) = \sigma_1, \dots, \sigma_n$, де $\sigma_i \in \{0, 1\}$ та

$$\sigma_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } M_i - \text{відмовивший модуль (о-ПМ);} \\ 0, & \text{якщо } M_i - \text{працездатний модуль (р-ПМ).} \end{cases} \quad (4)$$

Початковий стан системи $s(t=0) = s_0 = 00\dots 0$. Нехай Λ_n – множина усіх станів системи; $D = \{M_1, \dots, M_n\}$ – множина усіх модулів системи; $\Omega_v = \{U_1, \dots, U_L\}$ – множина усіх задач, які вирішуються у мережі в стані S_v ; $\Omega_i^v = \{U_1^i, \dots, U_\mu^i, \dots, U_m^i\}$ – підмножина задач, що працездатний модуль M_i здатний вирішувати, коли система знаходиться в стані S_v . Для стану s_0 задана множина $\Omega_0 = \{U_j\}$, $0 = \{U_j\}$, і початковий розподіл задач між усіма модулями, тобто підмножини $\Omega_i^v = \{U_1^i, \dots, U_\mu^i, \dots, U_m^i\}$. Нехай $Dfv = \{M_i\}_v$, $Drv = \{M_i\}_v$ – множини відповідно ПМ, які відмовили, і працездатних ПМ, що відповідають стану S_v ; Afv – множина усіх власних задач модулів, що відмовили, для стану S_v ; $Argv = \Omega_0 \setminus Afv$ – множина усіх власних задач р-Пм для стану S_v . Кожна задача $U_\mu^i \in \Omega_i^v$ характеризується ступенем важливості, що визначає мету функціонування системи управління і задається ваговим коефіцієнтом $\{\beta_{\mu i}\}$. Таким чином, результат розподілу задач визначається корисним ефектом E , який оцінюється сумарною ваговою характеристикою множин задач, які вирішуються в мережі у даному стані S_v , який називають функціональною потужністю мережі (E_v).

Математична модель задачі перерозподілу визначається як:

$$E_v = \sum_{i=1}^{n_v} \sum_{\mu=1}^{m_i} \beta_{\mu i} X_{\mu i} \rightarrow \max, \quad (5)$$

при обмеженнях:

$$\sum_{i=1}^{n_v} \sum_{\mu=1}^{m_i} \Delta T_{\mu i} X_{\mu i} \leq \Delta T_v^{\text{доп}}; \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{n_v} \sum_{\mu=1}^{m_i} V_{\mu i} X_{\mu i} \leq V_v^{\text{доп}}; \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{n_v} \sum_{\mu=1}^{m_i} t_{\mu i} X_{\mu i} \leq T_v^{\text{доп}}; \quad (8)$$

$$\sum_{\mu=1}^{m_i} X_{\mu i} \leq 1, \quad (9)$$

де

$$X_{\mu i} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \mu - \text{задача вирішується в } i - \text{му ПМ;} \\ 0, & \text{у іншому випадку.} \end{cases} \quad (10)$$

$\Delta T_v^{\text{доп}}$, $V_v^{\text{доп}}$, $T_v^{\text{доп}}$ – допустимі граничні значення відповідно до сумарного середнього часу обслуговування задачі в i -му ПМ, ємності пам'яті, яка необхідна для рішення задачі, та часу перерозподілу інформації у всій мережі в цілому.

Обмеження (9) визначає, що задача може бути призначена для рішення тільки на один вузол мережі. Таким чином, задача перерозподілу (5) – (9) зводиться до багаторазового рішення задачі ЦЛП із БЗ в умовах деградації мережі, яку необхідно вирішувати в масштабі реального часу.

1.2. Математична постановка задачі цілочисельного лінійного програмування з булевими змінними

Розглянемо сутність задач ЦЛП з БЗ на прикладі задачі про рюкзак. Загальна постановка цієї задачі формулюється таким чином. Необхідно знайти двійковий вектор \vec{x} , при якому досягається максимум функції:

$$f(\vec{x}) = \sum_{j=1}^n c_j \times x_j, \quad (11)$$

при виконанні умов:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, \quad (12)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad i = (\overline{1, m}); \quad j = (\overline{1, n}). \quad (13)$$

Для спрощення викладу математичної моделі розглянемо одновимірну задачу, тобто максимізуємо функціонал

$$f(\vec{x}) = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n, \quad (14)$$

при обмеженнях:

$$\sum_{j=1}^n a_{1j} x_j \leq b, \quad (15)$$

$$c_1 \geq c_2 \geq \dots \geq c_n; \quad a_{ij} > 0; \quad c_j > 0 \quad j = (\overline{1, n}). \quad (16)$$

Сутність рангового підходу до рішення задач ЦЛП з БЗ описана а [3, 4]. Тут приведемо лише деякі основні положення:

- всі можливі вектори рішень можуть бути розподілені по рангах, де кількість одиниць у векторі відповідає рангу;
- вектори будуються послідовно від найменших рангів до найбільших;
- перед побудовою векторів елементи мають бути відсортовані в порядку зменшення їхньої ваги функціоналу;
- всі вектори можуть бути представлені у вигляді графу, де кожна вершина позначає всі можливі вектори, останнім елементом яких є елемент вершини (рис. 1).

1.3. Узагальнена процедура А0

Основою реалізації рангового підходу є реалізація загальної процедури А0, описаної у [5]. Процедура А0 дозволяє на основі обраного правила відсікання безперспективних шляхів вирішити задачу (11) – (16), дозволяє формувати множини локальних екстремумів і виділяти серед них глобальний, використовуючи конструкцію графа ДЛ.

Програмно реалізація процедури А0 зводиться до виконання вкладених циклів, де цикл найвищого рівня виконує перебір рангів r , цикл другого рівня виконує перебір вершин (елементів вектора), чий порядковий номер дорівнює або вищий за поточний ранг. Цикл останнього, третього рівня виконує перебір всіх векторів попереднього рангу, останній елемент яких має порядковий номер, нижчий за порядковий номер елемента, визначений другим циклом, і викликає функцію побудови нового вектора. Новий вектор формується додаванням нового елемента до вектора попереднього рангу.

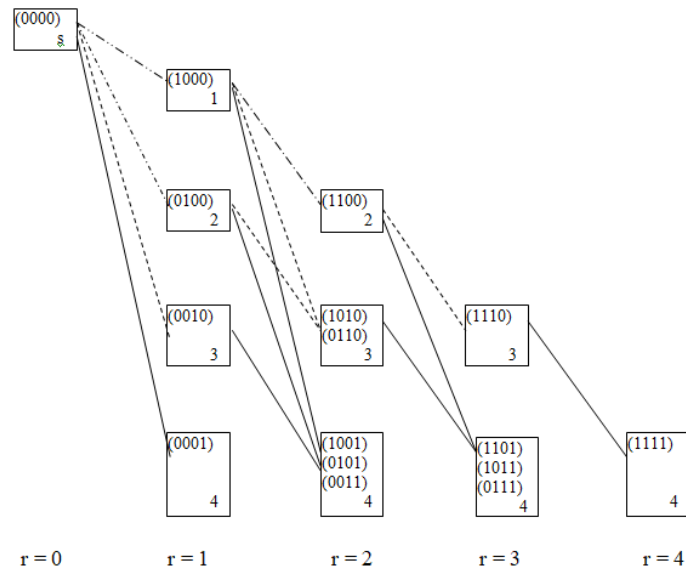


Рис. 1. Геометрична інтерпретація графа ДД

Для реалізації структури, в якій зберігаються зазначені вектори, було створено динамічний масив посилань на списки, розмірність якого визначається при визначенні розмірності задачі, і дорівнює їй. В списках зберігаються посилання на об'єкти, які являють собою вектори та їхні вагові параметри. Структура цих об'єктів приведена у [7]. Таким чином, всі вектори одного рангу містяться в одному спільному списку. Такий розподіл дещо змінює логіку перебору, оскільки комірки (тут і надалі коміркою позначатимемо всі вектори однієї вершини) не мають фізичних кордонів, а тільки логічні.

1.4. Стратегії відсікання безперспективних шляхів в графі ДД

В роботі [5] приведено декілька стратегій відсікання безперспективних шляхів, тобто стратегій, що дозволяють зменшити кількість векторів, які необхідно проаналізувати, відкидаючи ті, які не можуть привести до найкращого рішення.

Далі будуть розглянуті три стратегії відсікання комбінації, по дві з яких формують два наближені алгоритми пошуку найкращих векторів.

1.4.1. Стратегія відсікання L1

Наближена стратегія відсікання безперспективних шляхів L1 базується на виборі з кожної комірки тільки одного вектора з найбільшою вагою за функціоналом для побудови нового вектора. При цьому вага обмеження враховується тільки в розумінні, що:

- забороняється обирати вектор, вага обмеження якого при додаванні нового елементу перевищить максимально допустиму вагу обмеження;
- якщо існують два чи більше векторів з однаковою вагою функціоналу, то слід розглянути той, вага обмеження якого є меншою.

При цьому слід зазначити, що довгий час вважалося правилом, що оскільки елементи векторів перед початком роботи відсортовуються в порядку зменшення ваги функціоналу, а при побудові векторів нові елементи вибираються послідовно, то перший вектор у комірці завжди матиме найбільшу вагу функціоналу, а решта векторів в комірці будуть відсортовані в порядку зменшення ваги функціоналу. Насправді це правило відповідає дійсності тільки за умови розгляду всіх можливих векторів рішення аналогічно до повного перебору. Але навіть у цьому випадку можна спостерігати стрибок значення ваги функціоналу ближче до середини комірки.

Розуміння того, що згадане правило є недійсним, підводить до питання, як визначити вектор з найбільшою вагою функціоналу. Наразі розглянуто дві основні можливості визначення вектора з найбільшою вагою функціоналу:

- за допомогою сортування;
- за допомогою простого порівняння.

Кожний із згаданих підходів має свої переваги та недоліки. Так, для сортування було обрано стандартну функцію сортування мови C++ `stable_sort()`, в основі якої лежить алгоритм сортування злиттям (`merge sort`). Значною перевагою використання сортування є те, що сортування необхідно провести тільки один раз, після чого, якщо найважчий за функціоналом вектор не зможе бути обраний, наступний буде обрано без зайвих дій. Недоліком такого підходу є додаткові витрати пам'яті, а також те, що якщо перший елемент задовольняє умовам обмеження (12) – (16), то сортування виконує велику кількість зайвої роботи.

Програмно даний підхід реалізовано таким чином:

- вектори однієї комірки переписуються до одномірного вектора для того, щоб не змінювати вихідну структуру даних і не впливати таким чином на подальші обчислення;
- виконуються два сортування, перше сортує вектори за вагою обмеження у порядку зростання, друге – за вагою функціоналу у порядку спадання. Важливо, що друге сортування залишає вектори у тій же послідовності, в якій вони надійшли, за умови, що їхні функціонали однакові.

Другий підхід засновано на ідеї, що в більшості випадків необхідний вектор буде знайдений за кілька перших спроб. Програмно він реалізований так, що:

- при першому проході відбувається перебір всіх векторів комірки і порівнюється за вагою функціоналу. Як тільки перший вектор обрано, для всіх наступних векторів, що мають таку ж вагу функціоналу, відбувається додаткова перевірка ваги обмеження. Тобто обирається тільки такий вектор, вага функціоналу якого або більша за вагу поточного обраного, або така ж, але вага обмеження менша;
- якщо обраний вектор не може бути використаний для побудови вектора наступного рангу через отримувану вагу обмеження, то відбувається ще один цикл перебору, причому цього разу додається додаткове обмеження, яке не дозволяє обирати вектори тієї ж або більшої (для третього проходу і далі) ваги функціоналу ніж у попереднього обраного вектора.

В цілому метод з сортуванням вигідно використовувати за умови, що перші вектори з вищою вагою функціоналу будуть відкинуті і буде необхідно перебирати решту векторів комірки. Метод лінійного перебору є економнішим за сортування з точки зору використання додаткової пам'яті і кількості операцій, але підходить здебільшого у тих випадках, коли відповідний вектор знаходиться у першій трійці за вагою функціоналу.

1.4.2. Стратегія відсікання L2

Опис стратегії відсікання L2 у формалізованому вигляді описано в [5]. У спрощеному вигляді дану стратегію можна описати так, що для побудови нового вектора обирається тільки один вектор з кожної комірки попереднього рангу з меншим порядковим номером останнього елементу, ніж у додаваного елементу, який має найменшу у комірці вагу обмеження. Логічно, що якщо цей вектор не може бути обраний для побудови нового вектора, то інші вектори даної комірки не розглядаються.

Оскільки за вагою обмеження вектори всередині комірки ніяк не структуровані, то для вибору відповідного вектора є необхідність у додаткових механізмах відбору. Такими механізмами можуть стати вже використовувані у стратегії L1 сортування та лінійного пошуку.

Програмно підхід заснований на сортуванні схожим чином, до того як його реалізовано для L1:

- вектори однієї комірки переписуються до одномірного вектора для того, щоб не змінювати вихідну структуру даних і не впливати таким чином на подальші обчислення;
- виконуються два сортування, перше сортує вектори за вагою функціоналу у порядку спадання, друге – за вагою обмеження у порядку зростання. Важливо, що друге сортування залишає вектори у тій же послідовності, в якій вони надійшли за умови, що їхні обмеження однакові.

Таким чином, найпершим же вектором у відсортованій послідовності буде найлегший за вагою обмеження і одночасно найважчий за функціоналом серед тих векторів, які мають однакову з ним вагу обмеження. Недоліком такого підходу є те, що решта векторів у відсортованій послідовності не потрібні, але операції сортування для них виконані.

Другий підхід, тобто лінійний пошук програмно реалізований так, що фактично відбувається тільки один прохід по комірці, при якому відбувається перебір всіх векторів комірки і порівнюється за вагою обмеження. Як тільки перший вектор обрано, для всіх наступних векторів, що мають таку ж вагу обмеження, відбувається додаткова перевірка ваги функціоналу. Тобто обирається тільки такий вектор, вага обмеження якого або менша за вагу поточного обраного, або така ж, але вага функціоналу більша.

В цілому метод з сортуванням не є вигідним для використання даною стратегією, оскільки виконує зайві дії завжди, використовуючи при цьому додаткове місце у пам'яті пристрою.

1.4.3. Стратегія відсікання L3

Стратегія L3 базується на ідеї завчасного відсікання множин безперспективних шляхів наступним чином. Для кожного елемента розраховується його потенційна додатна вага функціоналу, яка дорівнює сумарній вазі функціоналу усіх елементів, що мають вищий порядковий номер. При побудові векторів, починаючи з першого рангу, розраховується чи перевищує його вага функціоналу разом з потенційною вагою функціоналу його останнього елемента вагу функціоналу еталонного вектора (зазвичай першого вектора рангу). Якщо це так, то на основі даного вектора можуть бути сформовані вектори більш високого рангу. Якщо така вага не перевищує еталонну, то слід розуміти, що розгляд будь-якого вектора, який може бути побудований на основі поточного, є надмірним, оскільки не дасть кращого результату. Отже такий вектор може бути виключений зі списку. Такий підхід економить пам'ять, але, що важливіше, він скорочує кількість векторів, які мають бути сформовані і проаналізовані.

Формальний опис цієї стратегії наведено у [5]. Програмна реалізація L3 зводиться до того, що для кожного елемента у початковому масиві вираховується його потенційна вага функціоналу як сума ваг функціоналів всіх наступних елементів. Причому вигідно розраховувати її, починаючи з останнього елемента, таким чином для кожного елемента виконується тільки одна операція додавання.

При створенні нового вектора виконується одна додаткова перевірка, а саме – перевіряється чи перевищує вага функціоналу нового вектора разом із потенційною вагою функціоналу першого вектора у списку і, відповідно, якщо список пустий, то дана перевірка не виконується. Недоліком цієї стратегії є те, що згідно з нею можна відкинути тільки один вектор і вектори, що будуються на його основі, за один раз. Тому було запропоновано модифіковану версію даної стратегії.

Модифікована стратегія базується на тих же принципах, що і звичайна L3, проте відрізняється у деяких окремих правилах відсікання.

На першому ранзі розглядаються вектори, що складаються з одного елемента. Оскільки вони фактично повторюють вхідний масив, то вони є одразу відсортованими за вагою функціоналу. Це означає, що якщо один з векторів за прогнозованою вагою функціоналу не перевищує ваги функціоналу першого елемента, то його та всі наступні вектори і всі, засновані на них, можна не розглядати.

На другому ранзі:

- якщо вектор містить перший елемент, то він завжди, за будь яких умов, є важчим за функціонал, за усі вектори, які побудовані після нього, не зважаючи на те, чи містять ці вектори перший елемент. Наприклад, вектор, що містить елементи з номерами 1 та 3, завжди буде важчим за вектори (2,3), (1,4), (2,4) і так далі. Тому, якщо на другому ранзі вектор, що має в своєму складі перший елемент, відкидається за L3, то інші вектори рангу можна не

розглядати, оскільки ані їх фактична вартість, ані потенційна не може перевищити такі у даного вектора;

- якщо вектор починається не з першого елемента, то його відкидання згідно зі стратегією L3 має призводити до кінця розгляду векторів поточної комірки. Наприклад, якщо вектор (2,5) був відкинтий, то жодний з векторів (3,5), (4,5) не зможе дати кращий результат. Отже комірка може бути закрита.

На третьому і більш високих рангах:

- якщо відкидається вектор, що містить перший елемент, то використовується та ж логіка, як і на другому ранзі при відкиданні вектора без першого елемента. Тобто переривається побудова векторів комірки;

- якщо відкидається вектор, що не містить першого елемента, то може бути відкинтий тільки сам цей вектор.

Таким чином, може бути відкинута значна кількість безперспективних векторів без необхідності формування та перевірки самих цих векторів.

1.5. Алгоритми A1 та A2

На основі зазначених стратегій відсікання та узагальненої процедури A0 будуються алгоритми пошуку найкращих рішень задач ЦЛП з БЗ.

В даній роботі розглядаються два алгоритми пошуку наближеного рішення A1 та A2, які засновано, відповідно, на комбінаціях A0, L1, L3 та A0, L2, L3. У формальному вигляді ці алгоритми представлено у [8]. В даному дослідженні аналізуватиметься вплив програмних реалізацій даних стратегій на наступні метрики роботи алгоритмів A1 та A2:

- похибка (різниця між знайденою відповіддю та точною);
- кількість проаналізованих векторів.

1.6. Експериментальне дослідження алгоритмів рангового підходу до вирішення задачі цілочисельного лінійного програмування з булевими змінними

1.6.1. Умови проведення експерименту

Було складено вісім варіантів експериментальної програми, по чотири реалізації кожного з алгоритмів. А саме:

- алгоритм A1 в реалізаціях зі стратегіями:
 - o L1 (з сортуванням), L3 (без модифікацій);
 - o L1 (без сортування), L3 (без модифікацій);
 - o L1 (з сортуванням), L3 (модифікована);
 - o L1 (без сортування), L3 (модифікована);
- алгоритм A2 в реалізаціях зі стратегіями:
 - o L2 (з сортуванням), L3 (без модифікацій);
 - o L2 (без сортування), L3 (без модифікацій);
 - o L2 (з сортуванням), L3 (модифікована);
 - o L2 (без сортування), L3 (модифікована).

Зазначені варіанти програми також у табл. 1.

Таблиця 1

Варіанти реалізації тестової програми

A1 / A2			
L3(без модифікацій)		L3(модифікована)	
L1(з сортуванням)	L1(без сортування)	L1(з сортуванням)	L1(без сортування)

Умови проведення експерименту: Ноутбук Acer Aspire 3, cpu Intel Core i3. Доступна кількість оперативної пам'яті 2,2 Гб. Розмірність задачі 150. Кількість тестів – 100, для кожної реалізації алгоритмів.

1.6.2. Результати дослідження

Результати дослідження за такими метриками, як похибка обчислення відповіді та кількість переглянутих векторів, наведено у зведених графіках.

На рисунках зібрано по чотири графіки тих експериментів, де використовувалася одна і та ж стратегія відсікання L1 або L2, або, простими словами, – графіки для всіх реалізацій A1 та A2. На рис. 2 приведено результати експериментів, щодо похибки обчислення при різних реалізаціях стратегій відсікання для алгоритму A1.

Як видно з рис. 2, здебільшого при використанні стратегії L1, тобто, в алгоритмі A1 незалежно від того, чи модифікована L3, похибка обчислення коливається від 0 до 7,6 відсотка. При цьому величина похибки практично не залежить від реалізації стратегій.

На рис. 3 наведено результати експериментів щодо похибки обчислення при різних реалізаціях стратегій відсікання для алгоритму A2.

На рис. 3 видно, що незалежно від реалізації стратегій відсікання похибка розрахунків за алгоритмом A2 не перевищує 6,3 %. Однак можна помітити тенденцію, що у приблизно половині тестів реалізація стратегії L2 через сортування виявилася точнішою, хоча і незначно (в межах 1,5 %). В решті тестів величина похибки не змінюється в залежності від програмної реалізації стратегій.

Другою розглядуваною метрикою є кількість проаналізованих векторів. На рис. 4 приведено результати експериментів щодо кількості проаналізованих векторів при різних реалізаціях стратегій відсікання для алгоритму A1.

З рис. 4 видно цікаву тенденцію. Будь-яка з реалізацій пропонує значне зменшення кількості проаналізованих векторів порівняно з класичним випадком для цієї задачі, тобто 2^{150} , пропонує розглядати максимум 173000 векторів. Проте набагато цікавішим є те, що при тому, що вплив на точність практично відсутній, запропонована модифікація стратегії відсікання L3 зменшує кількість проаналізованих векторів в середньому на 40000.

На рис. 5 наведено результати експериментів щодо кількості проаналізованих векторів при різних реалізаціях стратегій відсікання для алгоритму A2.

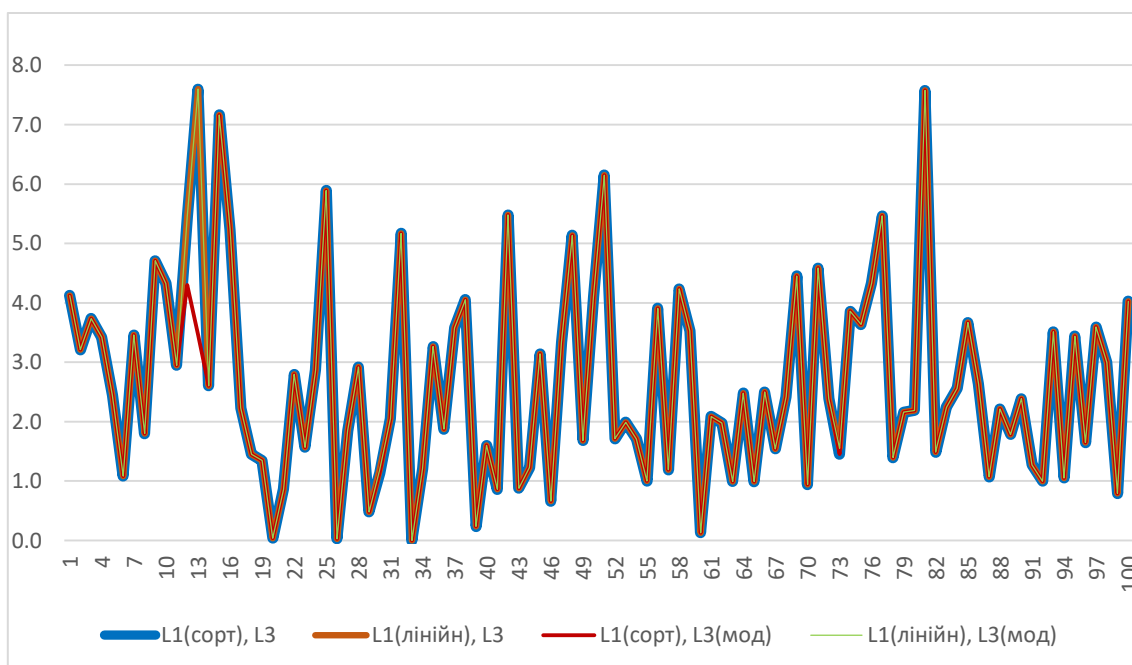


Рис. 2. Експериментальна оцінка похибки обчислення алгоритму A1 при різних реалізаціях стратегій відсікання

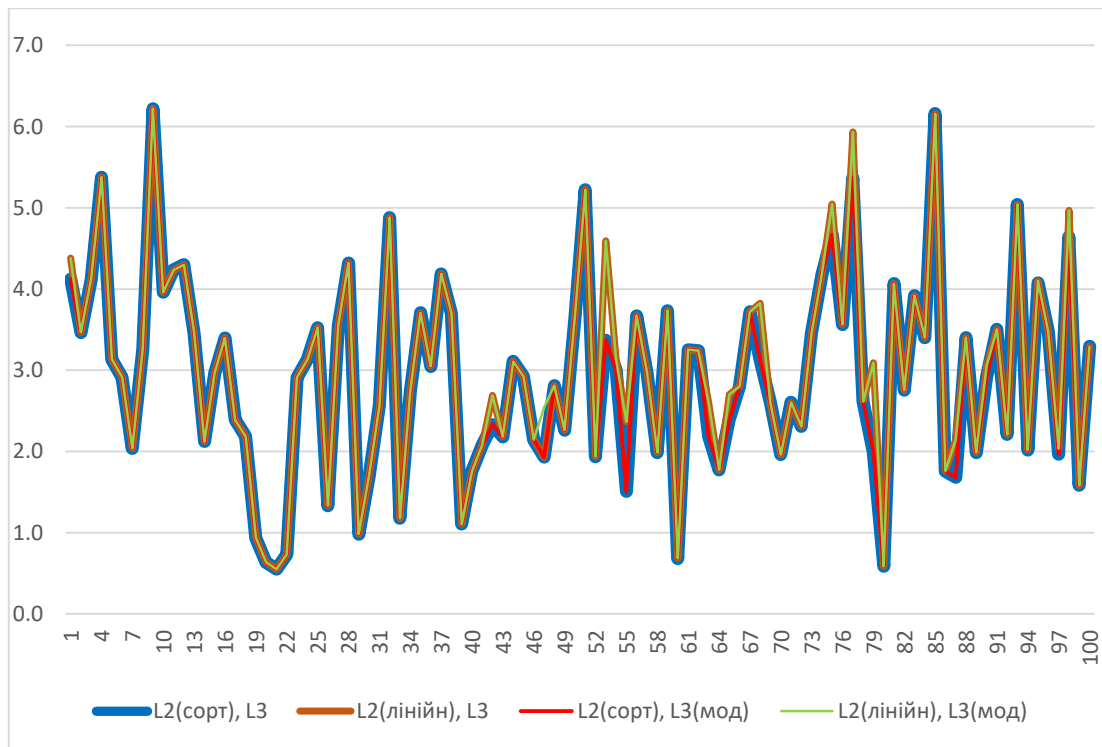


Рис. 3. Експериментальна оцінка похибки обчислення алгоритму А2 при різній реалізації стратегій відсікання

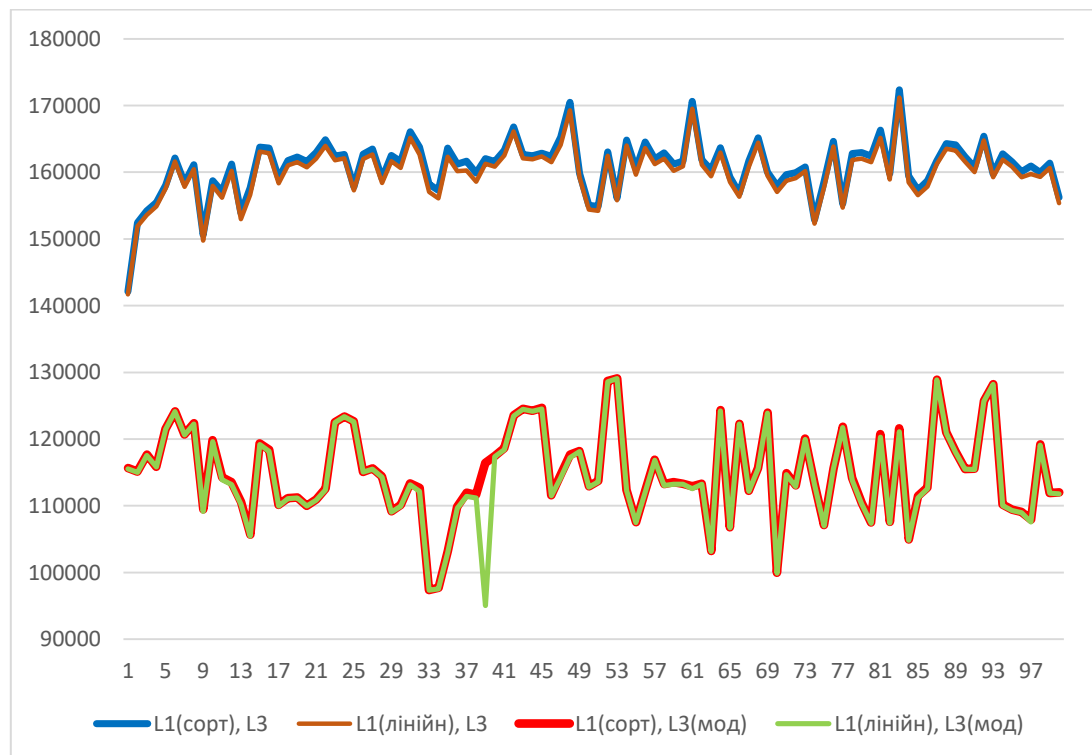


Рис. 4. Експериментальна оцінка кількості проаналізованих векторів алгоритму А1 при різній реалізації стратегій відсікання

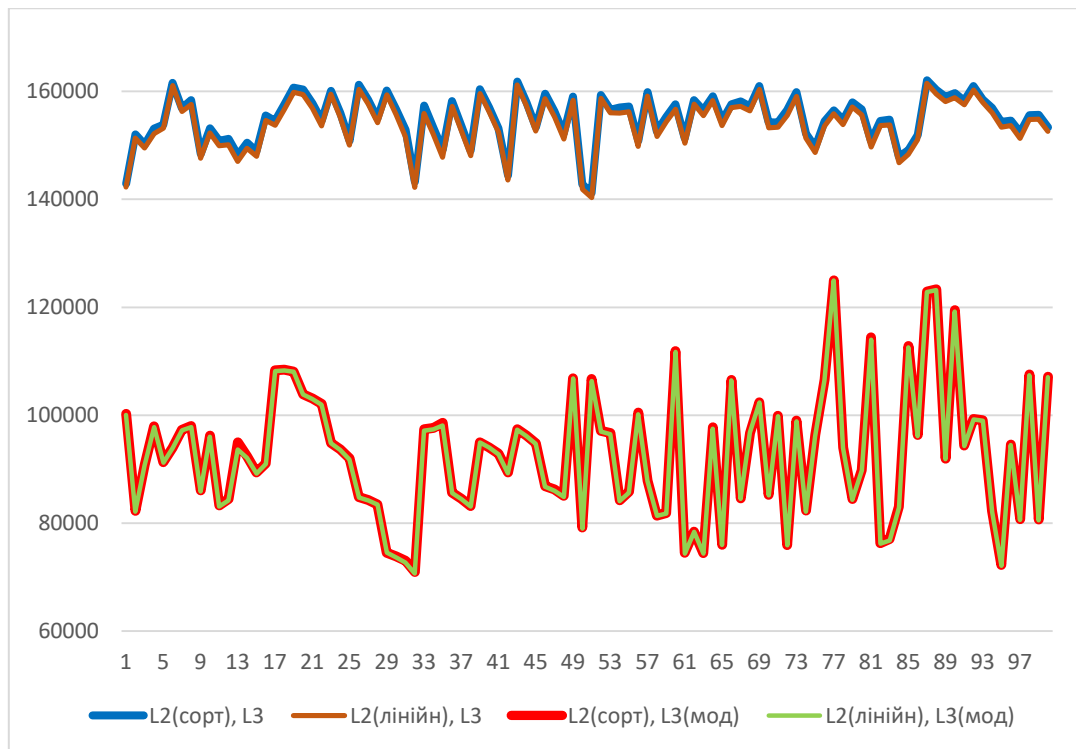


Рис. 5. Експериментальна оцінка кількості проаналізованих векторів алгоритму А2 при різній реалізації стратегій відсікання

З рис. 4 та 5 можна зробити висновок, що алгоритм А2 в середньому розглядає меншу кількість векторів ніж алгоритм А1. При цьому в обох алгоритмах використання модифікованої версії стратегії відсікання безперспективних наборів дає суттєвий вииграш у кількості переглянутих векторів близько до 40000.

На обох рисунках можна помітити, що вплив реалізації стратегій L1 та L2 незначний (у межах 1000 векторів).

Висновки

1. Встановлено, що задача планування розподілу ресурсів у мережі (багатопроекторній системі) може бути зведена до задачі цілочисельного лінійного програмування з булевими змінними (ЦЛП з БЗ). Такий підхід дозволяє враховувати як обмеження на ресурси, так і потребу в резервуванні, що підвищує надійність роботи інформаційно-комунікаційних систем. Особливістю даної задачі є необхідність її багаторазового вирішення в умовах деградації мережі в режимі реального часу.

2. Відомо, що задача цілочисельного лінійного програмування з булевими змінними належить до класу NP-повних задач. Це означає, що для неї не існує поліноміального алгоритму, що гарантував би рішення за визначений час. Тривалість обчислень залежить від розмірності задачі, яка визначає кількість можливих комбінацій рішень (векторів), які необхідно переглянути. У зв'язку з цим актуальними є методи пошуку наближених рішень, які дозволяють зменшити обчислювальні витрати, при цьому забезпечуючи прийнятний рівень точності.

3. Аналіз реалізацій запропонованих алгоритмів та стратегій відсікання безперспективних варіантів рішень дозволяє зробити такі висновки:

- використання алгоритму А1 дає похибку від 0 до 7,6 %, причому цей показник практично не залежить від модифікації L3;

- алгоритм А2 забезпечує похибку не більше 6,3 %, причому використання стратегії L2 реалізованої через сортування у деяких випадках дає більш точні результати (похибка менша на приблизно 1,5 %);

- всі запропоновані реалізації значно зменшують кількість переглянутих векторів порівняно з класичним випадком. Так, для задачі, яка при повному переборі вимагала б перегляду 2^{150} векторів, розглядається максимум 173000 векторів. При цьому модифікація стратегії відсікання L3 дозволяє скоротити кількість переглянутих векторів у середньому ще на 40000;

- виявлено, що алгоритм А2 в цілому розглядає менше векторів, ніж алгоритм А1. Використання модифікованої стратегії L3 у обох алгоритмах забезпечує додаткове скорочення кількості проаналізованих векторів;

- виявлено, що вплив програмної реалізації стратегій відсікання безперспективних шляхів на кількість проаналізованих векторів незначний і коливається в межах 1000 векторів.

Таким чином, результати дослідження підтверджують ефективність запропонованих стратегій у зменшенні обчислювальної складності задачі (в контексті зменшення кількості варіантів рішень, що потребують розгляду) при збереженні прийняттого рівня точності (похибка не перевищує 10 %). Рекомендується використання алгоритму А2, реалізованого з використанням стратегії L1 через лінійний пошук, та модифікованої стратегії L3.

Список літератури:

1. Laabadi S., Naimi M., El Amri H. and Achchab B. The 0/1 Multidimensional Knapsack Problem and Its Variants: A Survey of Practical Models and Heuristic Approaches // American Journal of Operations Research. 2018. No 8. P. 395–439.

2. Listrovoy S. V., Tretiak V. F., & Listrovaya A. S. Parallel algorithms of calculation process optimization for the boolean programming problems // Engineering Simulation. 1999. No 5. P. 569–579.

3. Третяк В., Голубничий Д., Коломійцев О., Мегельбей Г., Возний О., & Філіпенков О. Математична модель рангового підходу // Зб. наук. пр. ЛОГОС., 2020. Р. 116–122. <https://doi.org/10.36074/25.12.2020.v1.40>

4. Коломійцев О., Осієвський С., Третяк В., Закіров З., Романюк А., Нікітченко В., Логвиненко С., Лисиця А. Задачі дискретної оптимізації та їх постановка // InterConf. 2021. №75. С. 285–302. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.09.2021.033>

5. Голубничий Д., Коломійцев О., Осієвський С., Третяк В., Рибальченко А., Любченко О., Головченко О. Метод відсікання безперспективних варіантів для задач цілочисельного лінійного програмування з булевими змінними з використанням рангового підходу // Наук. зб. «InterConf+». 2024. №41(185). С. 526–555. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.01.2024.064>

6. Коломійцев О., Голубничий Д., Рибальченко А., Третяк В., Осієвський С., Возний О., Балабуха О., Качуровський Г., Грічанюк О., Галашевський Г., Сокова Т., Любченко О. Використання методів рангового підходу в моделі транзакційної системи з реплікацією фрагментів бази даних для розгортання у хмарному середовищі // Scientific Collection «InterConf+». 2023. №38(175). С.326–341. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.10.2023.030>

7. Голубничий Д., Головченко О. Features of the software model of the contracted graph in the (0,1)-knapsack problem // Proceedings of the Seventh International Scientific and Technical Conference "Computer and Information Systems and Technologies" Kharkiv : NURE, 2024. С. 25–26.

8. Пономаренко В.С. Цілочисельне програмування в економіці / В.С. Пономаренко, Д.Ю. Голубничий, В.Ф. Третяк. Харків : ХНЕУ, 2005. 204 с.

Надійшла до редколегії 15.11.2024

Відомості про авторів:

Голубничий Дмитро Юрійович – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, факультет комп'ютерної інженерії та управління; Україна; e-mail: dmytro.holubnychyi@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6873-7004>

Головченко Олександр Сергійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістрант кафедри електронних обчислювальних машин, факультет комп'ютерної інженерії та управління; Україна; e-mail: oleksandr.holovchenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7582-1746>

І.В. ОЛЕШКО, канд. техн. наук, К.О. ПАПАЗОВ

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АНОНІМНОСТІ КОРИСТУВАЧІВ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ОНЛАЙН-ОПИТУВАНЬ

Вступ

В епоху цифрових технологій, коли обмін інформацією відбувається миттєво, а дані стали цінним ресурсом, питання анонімності користувачів в онлайн-середовищі набуває особливої ваги. Зокрема, це стосується онлайн-опитувань, які є потужним інструментом для збору даних. Анонімність в онлайн-опитуваннях є важливою складовою для забезпечення правдивості відповідей, захисту особистих даних респондента та для запобігання небажаним наслідкам, таким як дискримінація або переслідування.

Проблема забезпечення анонімності користувачів у веб-середовищі є предметом численних досліджень. Багато з них підтверджують широке використання JavaScript для різноманітних цілей, включаючи відстеження поведінки користувачів, зокрема за допомогою трекерів [1]. Трекери можуть збирати різноманітну інформацію, від IP-адрес та даних про браузер до історії відвідувань та поведінки на сайті [2]. Рис. 1 демонструє загальний сценарій веб-відстеження, реалізований JavaScript-програмою. На рисунку показано, як дані про відвідувачів без їх явної згоди можна надсилати через заголовки HTTP на сервери третіх сторін.

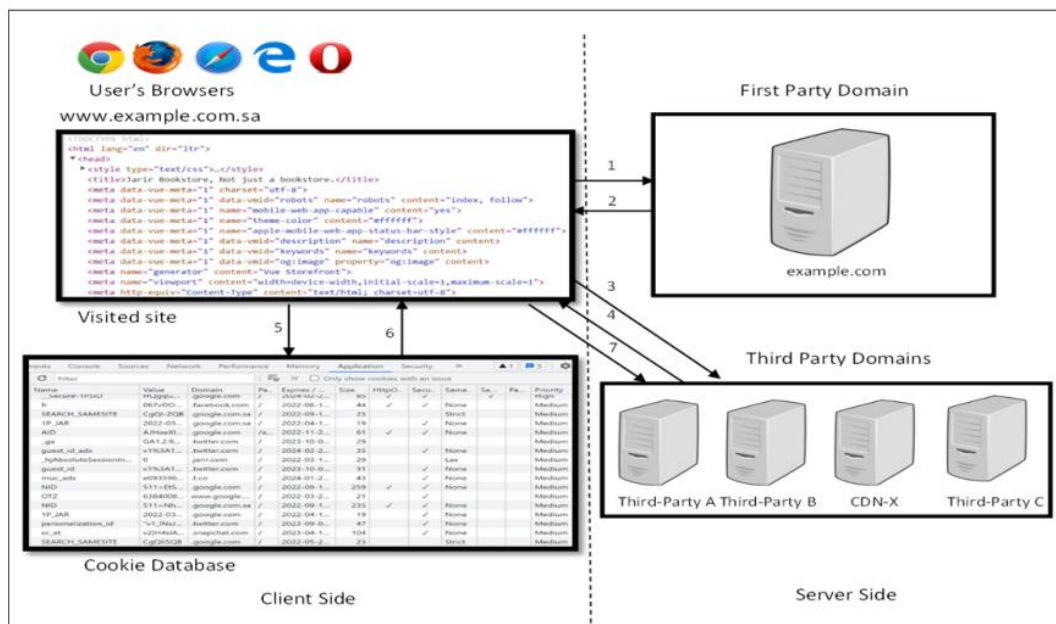


Рис. 1. Процес відстеження веб-сторінки та її відтворення за допомогою виконання JavaScript-програми. Examples.com використовує сторонні сервери (A, B, CDN-X і C) для отримання додаткового контенту та аналітичних досліджень

Останнім часом розроблено декілька інструментів для захисту від відстеження веб-користувачів, включаючи плагіни для браузерів. Ці інструменти засновані на блокуванні програм JavaScript та інших компонентів веб-сайту, які впливають на порушення анонімності. Наразі бракує ефективного підходу, який би надав оцінювання щодо анонімності респондентів при проведенні опитувань онлайн-додатками.

Метою статті є порівняльний аналіз розповсюджених онлайн-сервісів для проведення опитувань за критерієм анонімності. В статті також розглядаються основні інструменти для дослідження анонімності. Дослідники та розробники можуть використовувати наші висновки для покращення анонімності користувачів онлайн-додатків, а респонденти – для вибору найбільш безпечного додатку для проходження онлайн-опитувань.

1. Веб-додатки анонімних опитувань

На сьогодні найбільш розповсюдженими веб-додатками для проведення анонімних опитувань є Google Forms, SurveyMonkey, Typeform, Survio, Хoyoondo та Mentimeter (Menti) [3]. Проведемо порівняльний аналіз веб-додатків для анонімного опитування за наступними критеріями: безпека та конфіденційність, функціональні можливості, вартість використання та аналіз зворотних посилань. Аналіз зворотних посилань (Total Sites Linking In) є важливим аспектом для оцінки авторитетності та популярності веб-сайтів. Хоча цей показник не впливає безпосередньо на анонімність користувачів під час проходження опитувань, він відображає загальну довіру та розповсюдженість платформи. Дані отримано з інструменту Ahrefs [4]. Результати порівняльного аналізу розповсюджених веб-додатками для проведення анонімних опитувань наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Аналіз веб-додатків анонімних опитувань

Критерії	Google Forms	SurveyMonkey	Typeform	Survio	Mentimeter	Хoyoondo
Безпека та конфіденційність	Захист від XSS, CSRF, SQL-ін'єкцій. Використання TLS	Захист від XSS, CSRF, SQL-ін'єкцій. Використання TLS	Захист від XSS, CSRF, SQL-ін'єкцій. Використання TLS	Захист від XSS, CSRF, SQL-ін'єкцій. Використання TLS	Захист від XSS, CSRF, SQL-ін'єкцій. Використання TLS	Захист від XSS, CSRF, SQL-ін'єкцій. Використання TLS
Функціональні можливості	20+ типів питань, інтеграції з Google Sheets	25+ типів питань, аналітика, API інтеграції	30+ типів питань, інтерактивні форми, API інтеграції	15+ типів питань, експорт даних	10+ типів питань, інтерактив в реальному часі	5+ типів питань, планування зустрічей, голосування
Вартість використання	Безкоштовно	Від \$25/міс	Від \$35/міс	Безкоштовно	Від \$10/міс	Безкоштовно
Кількість зворотних посилань	1,000,000+	500,000+	100,000+	50,000+	50,000+	10,000+

Порівнюючи Google Forms, SurveyMonkey, Typeform, Survio, Mentimeter та Хoyoondo, можна зробити висновок, що всі розглянуті платформи забезпечують високий рівень безпеки та конфіденційності, мають дружній інтерфейс користувача та пропонують різні вартості використання. З розглянутих додатків варто виділити Google Forms. Google Forms надає безкоштовний доступ до платформи з веб-інтерфейсом та має найбільшу кількість зворотних посилань.

Розглянуті платформи значною мірою покладаються на JavaScript для забезпечення інтерактивності, збору даних та обробки результатів. JavaScript-програми, що використовуються в цих додатках, можуть автоматично збирати різноманітні метадані, які можуть бути використані для ідентифікації користувачів, навіть якщо вони не надають свої особисті дані безпосередньо в опитуванні. Наприклад, IP-адреса може бути використана для приблизного визначення місцезнаходження користувача, а комбінація даних про браузер та операційну систему може створити унікальний "відбиток" пристрою, що дозволяє відстежувати користувача навіть без використання cookies. Крім того, багато платформ використовують сторонні скрипти для аналітики, реклами та інтеграції з соціальними мережами, що ще більше збільшує ризик трекінгу. Наприклад, інтеграція з Facebook Pixel дозволяє відстежувати дії користувачів на сайті опитування та використовувати цю інформацію для таргетованої реклами в Facebook.

Для покращення анонімності в веб-додатках для опитувань можна застосовувати наступні методи:

1. Псевдонімізація даних: заміна ідентифікуючих даних, таких як IP-адреси, імена користувачів або адреси електронної пошти, на псевдоніми або унікальні ідентифікатори.

Це дозволяє зберігати дані опитування без прямої прив'язки до особи користувача, забезпечуючи конфіденційність.

2. Мінімізація збору даних: збір лише тієї інформації, яка є абсолютно необхідною для проведення опитування. Уникання збору зайвих даних, таких як повна адреса проживання або номер телефону, якщо вони не є критично важливими для дослідження.

3. Обмеження виконання сторонніх скриптів (CSP): використання Content Security Policy (CSP) для контролю завантаження та виконання сторонніх ресурсів, таких як скрипти, стилі та зображення. CSP дозволяє визначити, з яких джерел дозволено завантажувати ці ресурси, що зменшує ризик використання шкідливих скриптів, які можуть відстежувати користувачів.

4. Шифрування даних (HTTPS): Забезпечення шифрованого з'єднання між браузером користувача та сервером, на якому зберігаються дані опитування. HTTPS гарантує, що дані, що передаються між браузером та сервером, не можуть бути перехоплені та прочитані третіми особами, забезпечуючи конфіденційність та цілісність даних.

5. Використання локального зберігання даних: за можливості, зберігання даних опитування на стороні користувача, наприклад за допомогою Local Storage або IndexedDB, та їх подальша передача на сервер лише за згодою користувача. Це надає користувачам більше контролю над своїми даними та підвищує рівень анонімності.

6. Використання Тор або VPN: використання мережі Тор або VPN може допомогти приховати IP-адресу користувача, що ускладнює його ідентифікацію та відстеження його дій в інтернеті. Тор перенаправляє трафік через кілька випадкових вузлів, а VPN створює захищений тунель між комп'ютером користувача та сервером.

2. Інструменти для дослідження анонімності

Для аналізу анонімності та виявлення потенційних вразливостей веб-додатків існують різноманітні інструменти, які можна класифікувати за їхнім призначенням та функціональністю:

• Розширення для браузерів:

1. Ghostery[5]: аналізує веб-сторінки та відображає список трекерів, рекламних мереж та інших сторонніх скриптів, дозволяючи користувачам блокувати їх вибірково або всі одразу. Ghostery також надає інформацію про призначення кожного трекера, що допомагає користувачам приймати обґрунтовані рішення.

2. Privacy Badger[6]: автоматично блокує трекери, які відстежують користувачів на різних веб-сайтах. Privacy Badger використовує евристичний підхід, аналізуючи поведінку скриптів, а не списки блокування, що дозволяє йому ефективно боротися з новими та невідомими трекерами.

3. uBlock Origin[7]: легкий та ефективний блокувальник реклами та трекерів, який використовує мінімум ресурсів браузера. uBlock Origin базується на списках блокування, але також підтримує користувацькі фільтри та правила.

4. AdBlock Plus[8]: популярний блокувальник реклами, який також блокує багато трекерів. AdBlock Plus дозволяє користувачам створювати власні фільтри та білі списки.

5. NoScript[9]: блокує виконання всіх JavaScript, Java та інших скриптів за замовчуванням, забезпечуючи максимальний рівень захисту, але може суттєво обмежувати функціональність веб-сайтів. NoScript вимагає від користувачів ручного налаштування дозволів для кожного сайту.

6. Disconnect[10]: блокує широкий спектр трекерів (включаючи рекламні, аналітичні, соціальних мереж та контент-провайдерів), використовуючи бази даних відомих трекерів та евристичні методи. Візуалізує трекінг, відображаючи карту запитів з веб-сторінки, показуючи, які домени відстежують вашу активність. Забезпечує захист від деяких шкідливих програм та фішингових сайтів, блокуючи доступ до відомих шкідливих ресурсів. Табл. 2 описує кількість користувачів, правила фільтрації та статистику для інструментів захисту конфіденційності [11].

Правила фільтрації та статистика для інструментів захисту конфіденційності

Розширення для браузера	Користувачі	Правила фільтрування
Disconnect	400,000+	Чорний список
Ghostery	2,000,000+	Чорний список
Adblock Plus	43,000,000+	EasyList
uBlock	1,000,000+	Чорний список
NoScript	100,000+	Білий список
Privacy Badger	1,000,000+	Евристичний алгоритм

- **Інструменти розробника, вбудовані в браузер (Developer Tools):**

1. Network (Мережа): Показує всі запити, які браузер відправляє на сервери, включаючи запити на завантаження скриптів, зображень та інших ресурсів. Це дозволяє ідентифікувати трекери та аналізувати їхню поведінку.

2. Storage (Сховище): Показує cookies, Local Storage та інші дані, які веб-сайти зберігають в браузері користувача. Це дозволяє виявити трекінгові cookies та інші механізми відстеження.

3. Debugger (Відладчик): Дозволяє відслідковувати виконання JavaScript-коду та аналізувати його роботу. Це може бути корисним для виявлення складних трекінгових скриптів.

- **Автоматизовані системи тестування:**

1. Selenium WebDriver: Потужний інструмент для автоматизації браузера, який дозволяє створювати скрипти для автоматичного аналізу веб-сторінок та збору даних про JavaScript-програми. Selenium можна використовувати для тестування веб-додатків (функціональне, регресійне тестування тощо), а також для аналізу їхньої безпеки та конфіденційності, зокрема для дослідження поведінки JavaScript та відстеження запитів до сторонніх серверів. Selenium WebDriver підтримує різні браузери, але Google Chrome є одним з найпопулярніших та найчастіше використовуваних браузерів для тестування з Selenium, завдяки своїй стабільності, швидкості та підтримці сучасних веб-технологій. Існує спеціальний драйвер (ChromeDriver), який дозволяє Selenium WebDriver ефективно взаємодіяти з Chrome.

3. Проведення експерименту

3.1. Налаштування експерименту

Інструменти тестування, які використовувалися для збору даних та аналізу веб-додатків для анонімних опитувань:

- набір із шести найпоширеніших веб-додатків для анонімних опитувань, а саме – Google Forms, SurveyMonkey, Typeform, Survio, Хoyondo та Mentimeter (Menti);
- шість найбільш популярних безкоштовних розширень для браузера (Disconnect, Ghostery, Adblock Plus, uBlock, NoScript та Privacy Badger);
- тести проводилися на операційній системі Windows 11 Pro x64 та IDE PyCharm 2024.3.1.1 (Community Edition) для написання Python-коду;
- відкритий веб-браузер із відповідним веб-драйвером для автоматизованого тестування веб-додатків. У нашому експерименті використовувався браузер Google Chrome з ChromeDriver[12] та Selenium WebDriver для автоматичного тестування сайтів.

3.2. Збір даних

Для сканування шести найпопулярніших веб-додатків анонімного опитування ми імітували процес перегляду додатків на пристрої за допомогою Selenium WebDriver [13] – набору інструментів, який дозволяє отримати всі елементи DOM-дерева HTML-сторінки. Використовуючи Python-скрипти та веб-браузер, ми автоматизували процес перегляду веб-додатків у Google Chrome. Під час перегляду веб-додатків анонімного опитування наш застосунок очікує 100 секунд. Після цього ми зберігаємо DOM-дерево кожного додатку та шукаємо

JavaScript-програми, які називаються JS-скриптами, коли засоби захисту конфіденційності (PPTs) вимкнені (PPTs Off). В процесі сканування ми змогли створити набір даних із 125 елементів JavaScript. Одночасно ми створили окремий профіль Google Chrome для кожного розширення, щоб паралельно отримати JS-програми, коли PPTs увімкнені. Розширення встановлювалися вручну в окремий профіль Google Chrome. Як результат, ми отримали шість різних профілів Google Chrome із офіційної сторінки розширень Google Chrome. Після цього до кожного з розширень застосовувалися налаштування за замовчуванням, за винятком Adblock Plus і Ghostery. У Adblock Plus ми активували рекомендовані фільтри (блокувати додаткове відстеження, блокувати cookie-попередження, блокувати push-сповіщення та блокувати відстеження іконок соціальних мереж). У Ghostery налаштування за замовчуванням не активують жодних функцій фільтрації для уникнення відстеження веб-додатків. Натомість користувач повинен вручну налаштувати параметри для захисту від веб-відстеження [5].

Усі ці кроки виконувалися для проведення експерименту та захисту веб-додатків анонімного опитування від відстеження. Для оцінки ефективності PPTs ми провели підрахунок кількості заблокованих і дозволених JS-програм під час обробки запитів із 6 найпоширеніших додатків анонімних опитувань. Враховуючи динамічний характер веб-додатків і рекламу, яка з'являлась в різний час при доступі до додатків, експеримент проводився одночасно, щоб забезпечити сталість кількості JS-програм. Рис. 2 узагальнює структуру процесу аналізу.

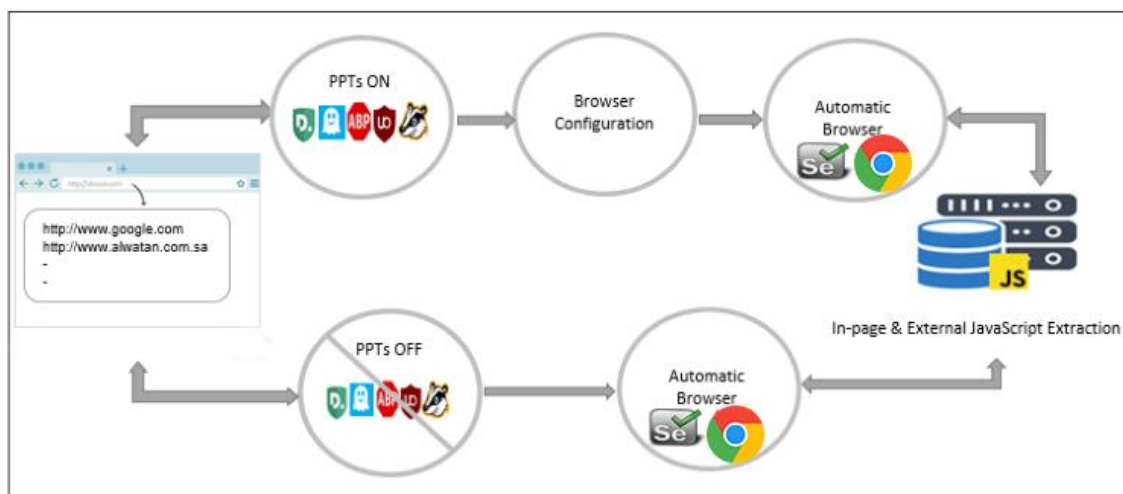


Рис. 2. Платформа вимірювання для інструментів захисту конфіденційності

3.3. Результати дослідження

У цьому розділі представлено результати аналізу веб-додатків онлайн-опитувань щодо забезпечення анонімності респондентів. Дослідження охоплює шість популярних платформ для анонімних опитувань: Google Forms, SurveyMonkey [14], Typeform [15], Survio, Хoуondo [16] та Mentimeter (Menti). Для оцінки ефективності інструментів дослідження анонімності ми отримали загальну кількість програм JavaScript, які були ідентифіковані на шести різних веб-додатках анонімних опитувань, коли засоби захисту конфіденційності вимкнено, а також, коли увімкнений кожен із засобів захисту окремо. На рис. 3 представлений результат дослідження.

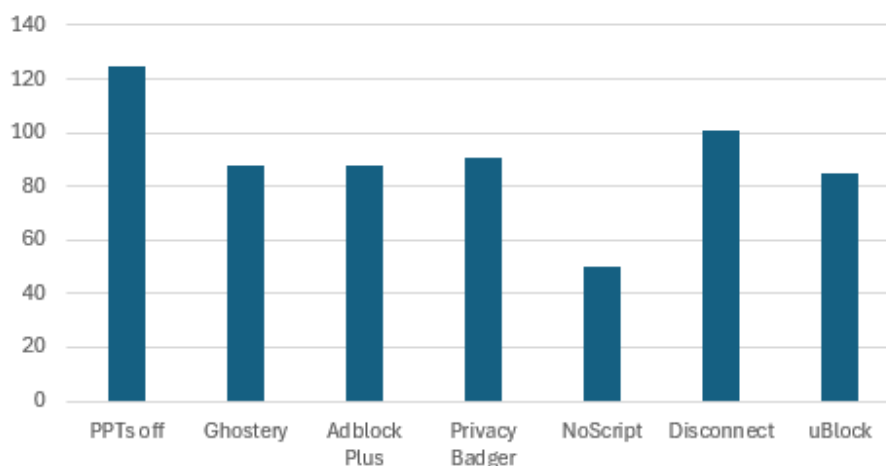


Рис. 3. Загальна кількість програм JavaScript, отриманих із 6 додатків

Табл. 3 відображає відсоткове співвідношення дозволених і заблокованих програм JavaScript для досліджуваних додатків анонімних опитувань загалом.

Таблиця 3

Відсоток усіх дозволених і заблокованих програм JavaScript

JS	PPTs off	Ghostery	Adblock Plus	Privacy Badger	NoScript	Disconnect	uBlock
На сторінці	125	88	88	91	50	101	85
Заблоковано	-	29,6 %	29,6 %	27,2 %	60 %	19,2 %	32 %
Не заблоковано	-	70,4 %	70,4 %	72,8 %	40 %	80,8 %	68 %

Проведені дослідження показують, що інструмент Ghostery здатний блокувати до 87 % [3] сторонніх скриптів, включаючи ті, що використовуються для реклами та веб-аналітики. Privacy Badger використовує евристичний підхід для автоматичного виявлення та блокування трекерів, що дозволяє йому ефективно боротися з новими та невідомими JavaScript. uBlock проявив себе, як ефективний інструмент з низьким споживанням ресурсів.

Нами було проведено середню оцінку кількості заблокованих програм JavaScript для кожного з шести додатків анонімних опитувань. Для розрахунку середньої кількості заблокованих Java-скриптів використовувалась формула

$$average = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (1)$$

де n – кількість інструментів, використаних для забезпечення конфіденційності, X_i – кількість заблокованих Java-скриптів i -тим інструментом.

Ця формула дозволяє об'єктивно оцінити ефективність кожного додатку анонімних опитувань, що є важливим кроком у виборі найбільш оптимального рішення для забезпечення конфіденційності користувачів.

На рис. 4 представлено результати оцінки кількості заблокованих програм JavaScript для кожного з шести додатків анонімних опитувань.

Табл. 4 показує чисельні значення щодо знайдених програм JavaScript та середньої кількості заблокованих JS-файлів для кожного додатку.

Результати дослідження показали, що на платформі Google Forms кількість заблокованих Java-скриптів дорівнює нулю, що свідчить про гарний рівень анонімності. У той же час на платформі Хоуondo в середньому блокується 22 Java-скрипти, що свідчить про значно більшу кількість JS-програм у веб-додатку та найгіршу анонімність його респондентів.

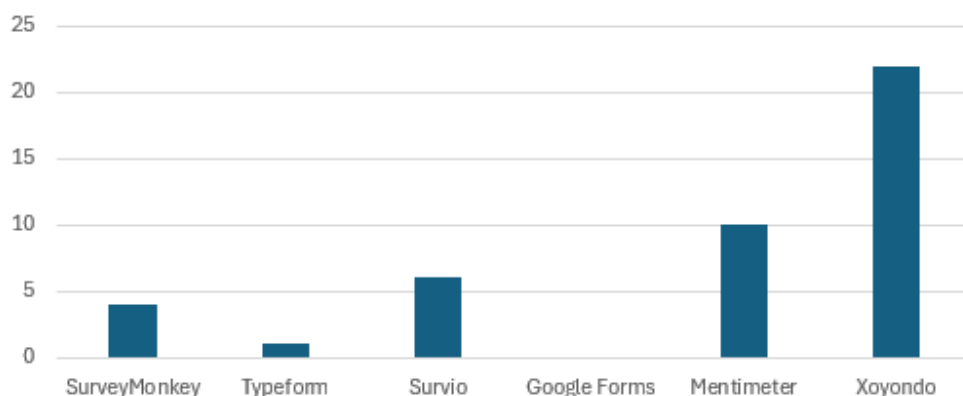


Рис. 4. Середня кількість заблокованих JavaScript для кожного веб-додатку

Таблиця 4

Статистика JS-файлів у веб-додатках для анонімних опитувань

JS	Google Forms	SurveyMonkey	Typeform	Survio	Xoyondo	Mentimeter
Всього	7	24	5	20	37	32
average	0	4	1	6	22	10

В табл. 5 представлено основні JS-файли, які було заблоковано в додатках анонімних опитувань, та надано їх опис.

Таблиця 5

Опис основних скриптів, що можуть впливати на конфіденційність респондентів

JS-файл	Призначення	Джерело	Функція
https://www.google-tagmanager.com/gtm.js?id=GTM-WM39SZ5M	Google Tag Manager (GTM) – інструмент, який допомагає веб-майстрам додавати та керувати тегами (фрагментами коду) на своїх вебсторінках.	Google	Використовується для відстеження аналітики, налаштування подій або інтеграції сторонніх сервісів.
https://c.amazon-adsystem.com/aax2/apstag.js	Amazon Ads API	Amazon	Забезпечує завантаження реклами та її персоналізацію на основі користувальницьких даних.
https://securepubads.g.doubleclick.net/tag/js/gpt.js	Google Publisher Tags	Google DoubleClick	Відповідає за динамічне завантаження та управління рекламними оголошеннями.
https://cdn.rudderlabs.com/v2/rudder-analytics.min.js	Скрипт для аналітики від RudderStack.	RudderStack – платформа для потокової передачі даних	Збирає та надсилає дані про взаємодію користувачів з вебсайтом у різні аналітичні системи (наприклад, Google Analytics, HubSpot).
https://analytics.google.com/g/collect	Відстеження взаємодії з вебсайтом через Google Analytics.	Google Analytics	Збирає дані про поведінку користувачів: кількість відвідувачів, сторінки, що переглядаються, місцезнаходження, мову, пристрій тощо.

Висновки

1. Описано проблему забезпечення анонімності користувачів під час проведення онлайн-опитувань. Інтеграція JavaScript як основного інструмента для забезпечення інтерактивності веб-додатків, водночас створює ризики щодо порушення анонімності респондентів за рахунок збору метаданих.

2. Порівняльний аналіз розповсюджених додатків анонімних опитувань показав, що всі розглянуті платформи забезпечують високий рівень безпеки та конфіденційності інформації. З розглянутих додатків було виділено Google Forms, який надає безкоштовний доступ до платформи та має найбільшу кількість зворотних посилань.

3. Надано рекомендації щодо покращення рівня анонімності в веб-додатках для проведення опитувань.

4. Основну увагу приділено оцінці рівня анонімності додатків онлайн-опитувань. У ході дослідження акцентовано увагу на ефективності популярних інструментів захисту конфіденційності, таких як Ghostery, Privacy Badger, uBlock Origin та NoScript. Встановлено, що хоча ці інструменти значно зменшують кількість небажаних трекерів, їх використання може впливати на функціональність веб-додатків. Проведений аналіз найпоширеніших платформ для анонімних опитувань (Google Forms, SurveyMonkey, Typeform, Хоуондо тощо) продемонстрував суттєві відмінності у підходах до забезпечення анонімності. Так, виявлено, що на платформі Google Forms кількість заблокованих Java-скриптів дорівнює нулю, що свідчить про гарний рівень анонімності. У той же час на платформі Хоуондо в середньому заблоковано 22 Java-скрипти, що свідчить про найгіршу анонімність респондентів серед додатків, які розглядалися.

5. У цілому вважаємо, що актуальними та необхідними є подальші дослідження у сфері розробки алгоритмів для виявлення шкідливих JavaScript, які впливають на анонімність, із застосуванням методів машинного навчання. Це дозволить ефективніше ідентифікувати обфусковані коди, які складно виявити традиційними способами.

Список літератури:

1. Ikram M., Asghar H.J., Kaafar M.A., Krishnamurthy B., Mahanti A. Towards Seamless Tracking-Free Web: Improved Detection of Trackers via One-class Learning. arXiv 2017, arXiv:1603.06289.
2. Kalavri V., Blackburn J., Varvello M., Papagiannaki K. Like a Pack of Wolves: Community Structure of Web Trackers // Proceedings of the International Conference on Passive and Active Network Measurement (PAM), Heraklion, Greece, 31 March–1 April 2016; Springer : Berlin/Heidelberg, Germany, 2016, pp. 42–54.
3. 18 сервісів для проведення опитувань [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.plerdy.com/ua/blog/18-servisov-dlja-provedenija-oprosov/>.
4. Your digital marketing strategy backed by real, actionable data [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ahrefs.com/>.
5. Bouhnik D., Carmi G. Interface Application Comprehensive Analysis of Ghostery // J. Comput. Syst. 2018. No 5. P. 4–10.
6. Privacy badger. Electronic Frontier Foundation [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://privacybadger.org/>.
7. UBlock origin – free, open-source ad content blocker. uBlock Origin [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ublockorigin.com/>
8. Adblock Plus | The world's #1 free ad blocker [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://adblockplus.org/>.
9. What is it? – noscript: own your browser! [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.noscript.net/>.
10. Disconnect. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://disconnect.me/>.
11. Bubukayr M., Frikha M. Effective techniques for protecting the privacy of web users // Applied sciences. 2023. V. 13, No 5. С. 3191.
12. Chrome DevTools Protocol [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://chromedevtools.github.io/devtools-protocol/>.
13. Selenium. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.selenium.dev/>.
14. SurveyMonkey: the world's most popular survey platform [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.surveymonkey.com/>.
15. Typeform: people-friendly forms and surveys [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.typeform.com/>
16. Хоуондо. Легкі планування та опитування [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://xoyondo.com/>.

Надійшла до редколегії 09.10.2024

Відомості про авторів:

Олешко Інна Вікторівна – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри безпеки інформаційних технологій; Україна; e-mail: inna.oleshko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8021-0467>

Папазов Кирило Олексійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, бакалавр; Україна; e-mail: kyrylo.papazov@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0102-461X>

Є.В. КОТУХ, канд. техн. наук, Г.З. ХАЛІМОВ, д-р техн. наук, І.Є. ДЖУРА, Г.О. ХІВРЕНКО

ЗАСТОСУВАННЯ СХЕМИ ШИФРУВАННЯ LINE В МЕХАНІЗМІ ІНКАПСУЛЯЦІЇ КЛЮЧІВ ДЛЯ ПРОТОКОЛУ АВТЕНТИФІКАЦІЇ В МЕРЕЖАХ 5G

Вступ

Мережа 5G є ключовим двигуном цифрової трансформації та Четвертої промислової революції. Послуги, які пропонує платформа 5G, є синергетичними та масштабованими, що дозволяє значно збільшити швидкість передачі даних за допомогою різних технологій радіодоступу (RAT). Мережа 5G надає високоякісні послуги, включаючи значне збільшення кількості запитів на підключення, високу швидкість передачі та обробки даних до 20 Гбіт/с, а також зменшену затримку мережі до 1 мс, навіть за умов мобільності користувача.

Технологія 5G дозволяє компаніям підключати більше пристроїв із швидшим обміном інформацією, що призводить до підвищення потенційної вразливості та значного розширення векторів загроз і атак. Питання безпеки та конфіденційності, такі як підробка мережі та відсутність конфіденційності в попередніх поколіннях RAN, були ретельно вивчені експертами з безпеки. Щоб вирішити ці проблеми, органи стандартизації 3GPP визначили протокол і процедури автентифікації АКА та керування ключами. Вони включають взаємну автентифікацію між пристроями користувача та мережею, цілісність і конфіденційність сигналів, а також отримання криптографічних ключів для захисту даних площини U та S.

3GPP визначив такі три методи автентифікації для мереж 5G:

- 5G-AKA: автентифікація 5G і керування ключами;

- EAP-AKA: розширюваний протокол автентифікації – автентифікація та керування ключами;

- EAP-TLS: розширюваний протокол автентифікації – безпека транспортного рівня.

Однак існують значні вразливості в API-інтерфейсах мережі 5G, зокрема щодо слабого захисту особистих даних користувачів і можливості несанкціонованого доступу до пристроїв IoT. Ці уразливості є критичними для систем дистанційного керування. В протоколі 5G-AKA були виявлені недоліки і, зазвичай, вважається, що АКА не забезпечує належного захисту персональних даних від активних зломисників [1 – 3]. Відзначено, що АКА необхідно наділити необхідними властивостями безпеки, які наразі відсутні. Було запропоновано кілька рішень на рівні протоколу автентифікації, що включають інкапсуляцію ключів (наприклад, EAP-AKA, 5G-AKA-FS, SUCI-AKA, 5G-IPAKA, АКА-LCCO) [2 – 7].

Поточний стандарт 5G не вирішує проблем, пов'язаних з квантовими обчисленнями, і продовжує покладатися на традиційні криптографічні методи, такі як криптографія на основі еліптичної кривої (ECC). Однак проблему дискретного логарифмування еліптичної кривої (ECDLP) можна розв'язати за поліноміальний час за допомогою квантових комп'ютерів, що становить значну загрозу безпеці.

Одним із можливих рішень для усунення цих уразливостей є впровадження квантово-захищеного шифрування для розробки протоколів автентифікації та координації ключів у мережах 5G. Враховуючи вимоги 3GPP щодо безпеки на рівні 128-бітного AES, автори [8] проаналізували ефективність протоколу автентифікації 5G-AKA з використанням механізму постквантової інкапсуляції ключів (КЕМ) з четвертого раунду конкурсу NIST. Однак схеми шифрування на основі коду, такі як McEliece і NTRU на основі решітки, демонструють низьку ефективність і великі розміри ключів порівняно зі схемами на основі проблеми дискретного логарифмування еліптичної кривої (ECDLP). Заміна поточної асиметричної криптографії постквантовими безпечними схемами призведе до витрат як з точки зору зв'язку, так і ефективності роботи мережі. Потрібні подальші дослідження, щоб визначити відповідне застосування постквантової захищеної криптографії для задоволення очікуваних показників продуктивності та функціональності архітектур 5G і 6G наступного покоління. Досягнення цієї мети вимагає дослідження нових, більш ефективних постквантових асиметричних схем.

Одне з можливих рішень для масштабованої секретності на основі криптосистеми з логарифмічними підписами та багатопараметричними групами наведено в [16 – 19]. Показано, що на групах великого порядку та малої розмірності можна вирішити задачу оптимізації накладних витрат за рахунок менших ключів.

Розвиток квантових обчислень прогресує як у практичних застосуваннях, так і у таких як тестування квантових комп'ютерів такими компаніями, як IBM і Google, так і в розробці алгоритмів, призначених для квантових комп'ютерів, таких як алгоритм Шора [14] і алгоритм Гровера [15]. Традиційні обчислювальні проблеми, які лежать в основі безпеки алгоритмів обміну ключами, такі як проблема цілочисельної факторизації, можуть бути вирішені за поліноміальний час зловмисниками, оснащеними квантовими комп'ютерами.

Національний інститут стандартів і технологій (NIST), який традиційно впливав на стандартизацію та впровадження криптографічних шифрів, таких як DES і AES, зараз бере участь у довгостроковому процесі стандартизації квантово-стійких шифрів [10]. Серед фіналістів четвертого раунду конкурсу KEM NIST, обраних для подальшої стандартизації, увійшли CRYSTALS-Kyber, BIKE, Classic McEliece і HQC. Стаття [8] надає оцінки обчислювальних витрат і розмірів параметрів для постквантових схем KEM. Відзначається, що Classic McEliece несе найвищі обчислювальні витрати. Однак Classic McEliece швидший за ECIES Secp256r1, тоді як Kyber перевершує обидва профілі ECIES за швидкістю. ECIES пропонує невелику вартість зв'язку порівняно з постквантовими KEM, тоді як Classic McEliece має найвищу вартість зв'язку через великий розмір відкритого ключа.

Актуальним завданням є вибір квантово-стійкої схеми для заміни ECIES найближчим часом. У статті запропоновано алгоритм інкапсуляції ключів на основі криптосистеми LINE з логарифмічними підписами для розробки протоколів автентифікації та координації ключів у мережах 5G. Використання спрямованого шифрування LINE пропонує переваги в масштабованості та неоднорідності, оптимізуючи обчислювальні і операційні витрати мережі.

Інтегрована схема шифрування на основі еліптичних кривих

Схема шифрування інтегрованої еліптичної кривої (ECIES) [9] є добре відомою гібридною схемою шифрування, що включає механізм інкапсуляції ключів (KEM) і механізм інкапсуляції даних (DEM), що дозволяє шифрувати повідомлення довільної довжини. Ця схема є ключовим компонентом протоколу 5G-AKA. ECIES – KEM має наступні три алгоритми:

KeyGen(p): під час введення загальнодоступного параметра p алгоритм виводить пару відкритого та закритого ключів (pk, sk) так, що $pk = sk \cdot G$, де p – параметр еліптичної кривої, стандартизований у secp256r1, а $G \in p$ – базова точка;

Encap(pk): під час введення відкритого ключа pk алгоритм генерує пару відкритих і закритих ключів сеансу (R, r) , а $R = r \cdot G$ потім виводить зашифрований текст $C_0 = R$ і спільний ключ $ks = KDF(r \cdot pk)$, де *KDF* функція виведення ключа.

Decap(sk, C_0): при введенні зашифрованого тексту C_0 та закритого ключа sk алгоритм видає загальний ключ $ks = KDF(sk \cdot C_0)$.

Для шифрування в 5G AKA TS 33.501 дозволяє використовувати два профілі ECIES, а саме Curve25519 і Secp256r1.

Механізм інкапсуляції ключів для постквантових алгоритмів залишається тим самим, але з іншими алгоритмами *KeyGen*(), *Encap*(), *Decap*() .

Реалізація спрямованого шифрування в механізмі інкапсуляції ключів

Ми пропонуємо реалізацію механізму інкапсуляції ключів (KEM) на основі спрямованого шифрування в криптосистемі LINE [11]. Побудова цієї криптосистеми базується на відомій алгебраїчній задачі, яка стверджує, що єдине рішення існує лише для повністю визначеної системи лінійних рівнянь. Коли система рівнянь визначена неповністю, кількість розв'язків визначається множиною можливих розв'язків. Єдина можлива атака на криптосистему передбачає вичерпний пошук і визначення змінних у системі лінійних рівнянь.

Основним криптографічним примітивом в алгоритмі є логарифмічний підпис, який реалізує безключове шифрування з властивістю факторизації ключа. Система лінійних рівнянь пов'язує значення логарифмічних сигнатур, які служать їй змінними, а безпека криптосистеми визначається міцністю набору рішень [12]. Спрямоване шифрування в криптосистемі LINE складається з наступних етапів:

- налаштування загальних параметрів криптосистеми;
- побудова секретного логарифмічного підпису над $F(2^m)$ полем;
- створення відкритих і закритих ключів криптосистеми;
- побудова неповної системи лінійних рівнянь для логарифмічних сигнатур;
- шифрування.

Реалізація алгоритму KeyGen

Ми повинні встановити рівень секретності та побудувати загальні параметри криптосистеми. Ми повинні виконати наступні п'ять кроків.

Крок 1. Налаштування загальних параметрів криптосистеми

Параметри криптосистеми LINE наступні:

- розмір слів, поданих над полем $F(2^m)$, $m = 8, 16, \dots, 64$;
- значення L, K , де L – кількість рівнянь, а K – кількість параметрів системи лінійних рівнянь.

Значення mL визначає довжину узгодженого секретного ключа ks в алгоритмі КЕМ на основі криптосистеми LINE, значення $m(K - L)$ – секретність криптосистеми LINE щодо рейдерських атак за рахунок визначення система лінійних рівнянь.

Розглянемо приклад 64-розрядної криптографії для постквантового КЕМ. Зафіксуємо обчислення для 8-розрядних слів ($m=8$) і, відповідно, отримаємо значення $L=64/8=8$ і $K=16$. Ми визначимо криптосистему LINE на основі 16 8-розрядних логарифмічних сигнатур, які з'єднані в систему з 8 лінійних рівнянь.

Крок 2. Побудова секретного логарифмічного підпису

Секретна факторизована логарифмічна сигнатура будується на основі простої логарифмічної сигнатури β_1 типу $(\overbrace{2, \dots, 2}^m)$ за допомогою наступних секретних гомоморфних перетворень [13] $\beta_1 \xrightarrow{\rho_1} \beta_2 \xrightarrow{\rho_2} \beta_3 \xrightarrow{\rho_3} \beta_4 \xrightarrow{\rho_4} \beta_5 \xrightarrow{\rho_5} \beta$, де

ρ_1 – змішування записів у блоках підписів β_2 ;

ρ_2 – таємне перетасування блоків підписів β_3 ;

ρ_3 – рандомізація записів масиву підписів на основі секретної матриці $\beta_4(i) = \omega_{m \times m} \oplus \beta_3(i)$;

ρ_4 – секретне гомоморфне перетворення рядків масиву $\beta_5(i) = \gamma \cdot \beta_4(i)$, $i = \overline{1, 2m}$, $\gamma \in F(2^m)$;

ρ_5 – секретне гомоморфне перетворення рядків масиву $\beta(i) = \beta_5(i) \cdot \omega_{m \times m}$, $i = \overline{1, 2m}$ $\omega_{m \times m}$ секретна оборотна двійкова матриця розмірності $m \times m$.

Нехай $\rho_1 = [11011110]$, $\rho_2 = [62054371]$,

$$\gamma = 1 + x + x^3 + x^5 + x^7$$

$$\omega_{m \times m} = \begin{vmatrix} 00111110 \\ 00101001 \\ 01110001 \\ 01010000 \\ 10001010 \\ 01010010 \\ 11101111 \\ 10000011 \end{vmatrix} \quad \omega_{m \times m} = \begin{vmatrix} 10000010 \\ 00011000 \\ 10100110 \\ 10110000 \\ 00111011 \\ 01111110 \\ 10011000 \\ 00010101 \end{vmatrix}$$

Результати обчисленої логарифмічної сигнатури для заданого дисплея представлені в табл. 1. Початкова проста логарифмічна сигнатура складається з 8 блоків по два записи в кожному, що відповідає типу $(\overbrace{2, \dots, 2}^m)$. Блоки в таблиці розділені підкресленням.

Таблиця 1

Представлення логарифмічної сигнатури

β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	$ls = \beta$
00000000	10000000	00000000	00111110	00101001	10001000
<u>10000000</u>	00000000	00100000	00011110	01000000	00011000
00000000	01000000	01001110	01100111	11011101	01111010
<u>01000000</u>	00000000	01000111	01101110	01110111	11111101
00000000	00000000	01000000	00110001	00001001	00101110
<u>00100000</u>	00100000	00000000	01110001	11011011	10011100
00000000	01110000	00111100	01101100	11011110	11110111
<u>01110000</u>	00000000	11011000	10001000	10010011	10111111
01000000	10111000	10111000	00110010	01001100	01011101
<u>10111000</u>	01000000	01000000	11001010	11101000	00000111
11011000	00111100	01110000	00100010	11000000	10011010
<u>00111100</u>	11011000	00000000	01010010	11110111	01111111
10110100	01111110	10000000	01101111	10011011	10000100
<u>01111110</u>	10110100	00000000	11101111	01001110	11000101
01001110	01001110	01111110	11111101	01101011	00001000
<u>01000111</u>	01000111	10110100	00110111	10000011	00001111

Для криптосистеми з параметрами $L = 8$ і $K = 16$ необхідно побудувати $K = 16$ масивів логарифмічних сигнатур. $ls_k, k = \overline{1, K}$: $L=8$ факторизований і $KL=8$ нефакторизований.

Крок 3. Побудова секретних ключів криптосистеми

Секретними ключами криптосистеми LINE є масиви $(\alpha_{i,j})_k, (t_j)_k, (\tau_j)_k, i = \overline{1, 2}, j = \overline{1, m}, k = \overline{1, K}$ і тасмне перетворення $\psi_{m \times m}$. Індекс $i = \overline{1, 2}$ показує кількість записів в одному блоці логарифмічного масиву, індекс $j = \overline{1, m}$ – кількість блоків у масиві ls . Записи секретних масивів розпізнаються за m бітовими словами. Для нашого прикладу в табл. 2 представлено згенерований $(\alpha_{i,j}), (t_j), (\tau_j)$ для першого логарифмічного підпису ls_1 .

Таблиця 2

Параметри логарифмічної сигнатури

$(\alpha_{i,j})$	(t_j)	(τ_j)	$\psi_{m \times m}$
10100000	00100101	00001100	00010100
<u>00010011</u>	10000100	00101001	00001011
11011011	11110110	10010101	01001110
<u>11111101</u>	01011000	11110111	01001001
11101001	01110111	11001111	10010001
<u>11011111</u>	11011000	10011010	00000110
11110010	10110101	01111111	10100001
<u>00001000</u>	11111001	11101110	00000011
10000100			
<u>01111000</u>			
10000110			
<u>00010010</u>			
11111101			
<u>00101110</u>			
11100011			
<u>01111111</u>			

Для криптосистеми з $K=16$ логарифмічних масивів необхідно побудувати 16 масивів $(\alpha_{i,j})_k, (t_j)_k, (\tau_j)_k$.

Крок 4. Побудова відкритих ключів криптосистеми

Відкритими ключами криптосистеми LINE є масиви $(\gamma_{i,j})_k$ і $(\lambda_{i,j})_k, i = \overline{1, 2}, j = \overline{1, m}, k = \overline{1, K}$. Побудова масивів визначається виразами для логарифмічних індексів, що розкладаються на фактори $ls_k, k = \overline{1, L}$:

$$(\gamma_{i,j})_k = (\beta_{i,j})_k + (t_j) + (\alpha_{i,j})_k \psi, (\lambda_{i,j})_k = (\alpha_{i,j})_k + (\tau_j)_k \quad (1)$$

і для нефакторизованих логарифмічних підписів $ls_k, k = \overline{L+1, K}$

$$(\gamma_{i,j})_k = (\beta_{i,j})_k \psi + (t_j)_k, (\lambda_{i,j})_k = (\beta_{i,j})_k + (\tau_j)_k \quad (2)$$

Табл. 3 показує розраховані $(\gamma_{i,j}), (\lambda_{i,j})$ згідно з виразами (1), (2) для першої логарифмічної сигнатури ls_1 . Для криптосистеми з $K=16$ логарифмічних масивів необхідно побудувати 16 масивів $(\gamma_{i,j})$ і $(\lambda_{i,j})$.

Таблиця 3
Побудова масивів
відкритих ключів

$(\gamma_{i,j})$ для ls_1	$(\lambda_{i,j})$ для ls_1
11110111	10101100
11010110	00011111
10011011	11110010
11110101	11010100
00011011	01111100
00001001	01001010
00010110	00000101
01110110	11111111
00111000	01001011
11101101	10110111
11110001	00011100
01001111	10001000
10111101	10000010
00001000	01010001
00000010	00001101
11001111	10010001

Крок 5. Побудова неповної системи лінійних рівнянь для логарифмічних сигнатур

Ми реалізували випадковий алгоритм побудови системи з L лінійних рівнянь і K параметрів. Ми згенерували двійкову випадкову матрицю $K \times K$ рангу K . Будь-які L членів матриці визначатимуть коефіцієнти для L лінійних рівнянь.

Для нашого прикладу з $L = 8$ і $K = 16$ представляємо наступний набір рівнянь:

$$\begin{aligned} U_1 &= y_1 + y_5 + y_9 + y_{13} & U_5 &= y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \\ U_2 &= y_2 + y_6 + y_{10} + y_{14} & U_6 &= y_5 + y_6 + y_7 + y_8 \\ U_3 &= y_3 + y_7 + y_{11} + y_{15} & U_7 &= y_1 + y_8 + y_{11} + y_{14} \\ U_4 &= y_4 + y_8 + y_{12} + y_{16} & U_8 &= y_2 + y_5 + y_{12} + y_{15} \end{aligned} \quad (3)$$

Значення y_i розпізнаються за $m=8$ -ма розрядними словами, і після підстановки та обчислення $U_j, j = \overline{1, L}, L=8$ отримаємо L 8 розрядних слів текстового шифру.

Розглянемо операційні витрати на *KeyGen*. Витрати для системи лінійних рівнянь дорівнюють $L \cdot K$ біт. Витрати на відкриті ключі – масиви $(\gamma_{i,j})$ складатимуть mK m -бітних слів. Інші масиви K $(\lambda_{i,j})$ можна побудувати за допомогою генератора випадкових послідовностей. Для прикладу 64-розрядної криптографії ($L=8, K=16, m=8$) сумарні витрати дорівнюватимуть $L \cdot K=128$ біт і $mK=128$ байт.

Реалізація алгоритму Encap

При введенні відкритих ключів-масивів $(\gamma_{i,j})$ алгоритм $(\lambda_{i,j})$ генерує закритий ключ R і зашифровані тексти C_0, C_1 . Приватний ключ R складається з двох частин $R = R_1 \| R_2$, де R_2 – це випадковий ключ сеансу, призначений для рандомізації C_0, C_1 і відкидається під час декапсуляції. Загальний ключ формується значенням R_1 . Зашифровані тексти C_0, C_1 обчислюються в два етапи. Спочатку ми представляємо R у вигляді K m -розрядних слів. Крім того, R_1 виражаємо L у m -розрядних словах $r_e, e = \overline{1, L}$ а R_2 – KL у m -розрядних словах $z_e, e = \overline{1, K-L}$.

Слова r_e є аргументами під час обчислень на масивах $(\gamma_{i,j})_k$ і $(\lambda_{i,j})_k$ – відкритих ключах, побудованих для факторизованих логарифмічних підписів (1), а слова z_e є аргументами під час обчислень на випадкових масивах $(\gamma_{i,j})_k$ і $(\lambda_{i,j})_k$ – нефакторизованих логарифмічних підписах (2). Для обчислених $(\gamma_{i,j}(r_e))_k$ і $(\lambda_{i,j}(r_e))_k$ та обчислених $(\gamma_{i,j}(z_e))_k$ і $(\lambda_{i,j}(z_e))_k$ ми використовуємо порозрядне представлення слів r_j і z_j . Обчислення для аргумента r_e визначаються порозрядним підсумовуванням членів масиву $(\gamma_{i,j})_k$:

$$(\gamma_{i,j}(r_e))_k = (\gamma_{i,j}(r_{e1}, r_{e2}, \dots, r_{em}))_k = \sum_{j=1}^m (\gamma_{r_{e_j}, j})_k. \quad (4)$$

Обчислення для масивів $(\lambda_{i,j})_k$ для аргументу r_e також реалізуються за правилами формули (4). Це також вірно для обчисленого за аргументом z_e . Для нашого прикладу 64-розрядної криптографії (L=8, K=16, m=8) табл. 4 представляє згенеровані слова R_1 та R_2 .

Таблиця 4
Узагальнювальні слова R_1 і R_2

R_1	R_2
00100011	00011000
00010000	10101010
10101110	10101010
11010100	11111101
00110011	11110000
11111010	11101101
10111101	11010001
00100110	10001001

Продемонструємо обчислення $(\gamma_{i,j}(r_e))_k$ з використанням виразу (4) для першого слова $r_1 = 00100011$ з табл. 4. Давайте подивимося на перший масив $(\gamma_{i,j}(r_1))_1$, представлений у табл. 3. Виберіть записи $(\gamma_{i,j}(r_1))_1$ відповідно до бітового представлення r_1 .

Коли значення біта дорівнює 0, вибирається перший запис у блоці, що відповідає номеру біта в послідовності, а другий запис вибирається, коли значення біта дорівнює 1. Порядок вибору та обчислений результат представлені у табл. 5. Вибрані записи виділено жирним шрифтом. Блоки підкреслені. Стовпці 3 і 4 показують результати, обчислені для $(\gamma_{i,j}(r_e))_k$, і $k = \overline{1, K}$ – для $(\lambda_{i,j}(r_e))_k$ всіх $(\gamma_{i,j}(z_e))_k$ і $(\lambda_{i,j}(z_e))_k$ логарифмічних сигнатур.

Таблиця 5
Обчислені масиви та вибрані записи

$(\gamma_{i,j})_1$	$(\gamma_{i,j}(r_1))_1$	$(\gamma_{i,j}(r_e))_k$, $(\gamma_{i,j}(z_e))_k$	$(\lambda_{i,j}(r_e))_k$ $(\lambda_{i,j}(z_e))_k$
11110111	11110111+	01111101	10000110
<u>11010110</u>	10011011+	10000111	10001000
10011011	00001001+	10110101	00100110
<u>11110101</u>	00010110+	01000111	11000011
00011011	00111000+	10010000	01000010
00001001	11110001+	11101000	01000101
00010110	00001000+	00001010	11010101
<u>01110110</u>	11001111 =	01101100	10110000
00111000	01111101	10001001	10110001
<u>11101101</u>		11111110	11111010
11110001		00110001	11001010
<u>01001111</u>		10101001	00010100
10111101		10010010	01011001
00001000		01111011	00111011
00000010		11110101	10101000
11001111		01010000	11011010

На другому кроці виконуються розрахунки за лінійними рівняннями (3). У вирази (3) підставимо значення $y_k = (\gamma_{i,j})_k$ та обчислимо L слів шифротексту C_0 . Потім замінюємо $y_k = (\lambda_{i,j})_k$ L слів і отримуємо зашифрований текст C_1 . Табл. 6 показує розраховані шифртексти C_0 і C_1 для нашого прикладу. Операційні витрати на передачу зашифрованих текстів складають 2 mL біт.

Таблиця 6
Розраховані шифртексти C_0 і C_1

C_0	C_1
11110110	00101100
11101010	00001100
01111011	10010001
11010010	10111101
00001000	11101011
01011011	11000111
01001011	01110110
00011110	01100010

Реалізація алгоритму Desap

При введенні зашифрованого тексту C_0 , C_1 і закритого ключа sk алгоритм видає загальний ключ $ks = R_1$. На першому етапі розшифровки ми повинні розрахувати

$$D_l = C_{0l} + C_{1l}\psi + t_l + \tau_l\psi, \quad l = \overline{1, L}. \dots\dots\dots(5)$$

Значення C_{0l} , C_{1l} , секретної матриці ψ визначені в табл. 6 і 2. Необхідно розрахувати значення t_l і τ_l .

У табл. 2 представлені масиви секретних параметрів (t_j) та (τ_j) для першої логарифмічної сигнатури ls_1 . Для кожної логарифмічної сигнатури $(\tau_j)_k$ необхідно обчислити суму рядків масиву $(t_j)_k$. Для нашого прикладу значення t_k і τ_k представлені в табл. 7.

Далі підставимо значення $y_k = t_k$ і $y_k = \tau_k$ у вираз (3) і обчислимо L слів t_l і τ_l . Отримані значення наведені в графах 3 і 4 табл. 7. Підставляючи C_{0l} , C_{1l} , ψ , t_l і τ_l в (5), отримуємо L m розрядних слів D_l (стовпець 5 табл. 7). Можна показати, що під час обчислення D_l у виразі (5) викреслюються нефакторизовані логарифмічні індекси (2), а L слів D_l будуть з'єднані L лінійними виразами зі значеннями L логарифмічних індексів (1), що розкладаються на множники.

Таблиця 7
Розрахунок значення t_k і τ_k

t_{1+16}	τ_{1+16}	t_{1+8}	τ_{1+8}	D_{1+8}	β_{1+8}
11101100	10000011	01110011	01100001	00011010	10010100
01010111	10100111	01010111	11101100	11101100	10101011
00100011	10111001	00010110	01100001	01110101	11111110
00101100	00010111	01010011	01001110	00111011	00111011
00111101	11010000	10110100	10001010	11111010	01010001
00010011	10110010	11100001	00111001	10010100	01000111
10111100	10011011	00110000	11001111	11111010	10001011
11001111	10000111	01011101	01111110	10011101	11011111
01011110	11110000				
00001111	00101100				
11011110	11101000				
00001101	00010011				
11111100	11000010				
00011100	11010101				
01010111	10101011				
10111101	11001101				

Ці рівняння випливають із рівнянь (3) із заміною $y_k = \beta_k$ та видаленням y_k відповідних нефакторизованих логарифмічних індексів. Для нашого прикладу отримуємо

$$\begin{aligned} D_1 &= \beta_1 + \beta_5 + \beta_9 & D_5 &= \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 \\ D_2 &= \beta_2 + \beta_6 & D_6 &= \beta_5 + \beta_6 + \beta_7 \\ D_3 &= \beta_3 + \beta_7 & D_7 &= \beta_1 \\ D_4 &= \beta_4 & D_8 &= \beta_2 + \beta_5 \end{aligned} \quad (6)$$

В шостому стовпці табл. 7 наведено розв'язки невідомих для нашого прикладу β_k .

Останнім кроком дешифрування є факторизація $R_k = \beta_k^{-1}(R_k)$ – відновлення за значенням логарифмічної сигнатури вхідного слова. Перетворення факторизації виконується в порядку, зворотному перетворенню при побудові логарифмічної сигнатури:

$$\beta \xrightarrow{\rho^{-1}_5} \beta_5 \xrightarrow{\rho^{-1}_4} \beta_4 \xrightarrow{\rho^{-1}_3} \beta_3 \xrightarrow{\rho^{-1}_2} \beta_2 \xrightarrow{\rho^{-1}_1} R$$

Перетворення ρ^{-1}_5 реалізує множення на секретну матрицю $\omega^{-1}_{m \times m}$. Перетворення ρ^{-1}_4 реалізує множення на обернений поліном γ^{-1} . Перетворення ρ^{-1}_3 усуває шум шляхом додавання s ϖ . Перетворення ρ^{-1}_2 визначає перестановку бітів у блоках і ρ^{-1}_1 -перестановку блоків. Для значення першої логарифмічної сигнатури $\beta_1 = 10010100$ продемонструємо обчислення на нашому прикладі. Розрахунковий поліном. $\gamma^{-1} = x^2 + x^3 + x^4 + x^5$. Матрицю $\omega^{-1}_{m \times m}$ та розрахунки представлено в табл. 8.

Таблиця 8

Матриця $\omega^{-1}_{m \times m}$ та розрахунки

$\omega^{-1}_{m \times m}$	$\rho^{-1}_5 = \beta_1 \omega^{-1}_{m \times m}$	$\rho^{-1}_4 = \beta_5 \gamma^{-1}$	SUM (ϖ) $\oplus \beta_4$
01000010	10110000	10001100	00001110
00100110			
01111001			
00101011			
01101011			
11011001			
11000010			
11110011			

Для обчислення ρ^{-1}_3 обчислимо суму всіх рядків SUM (ϖ)=10000010 матриці ϖ та $\beta_3 = \text{SUM}(\varpi) \oplus \beta_4$.

Розкладання слова β_3 за допомогою простого логарифмічного підпису β_1 з табл. 1 представлено в табл. 9.

Таблиця 9

Приклад β_3 розкладання слова на множники

β_1	Розкладання на множники слова β_3	Результат
0 0000000	0000111 0	00011100
<u>1</u> 0000000	<u>0</u> 1001110	
00 000000	010000 0	
<u>0</u> 1000000	<u>1</u> 011010	
000 00000	11110 1	
<u>00</u> 100000	<u>00</u> 1111	
00000000	1100 1	
0111 0000	<u>10</u> 111	
01000000	011 1	
<u>10111</u> 000	<u>0</u> 111	
11011000	00 0	
<u>001111</u> 00	<u>000</u>	
1011010 0	0 0	
<u>01111110</u>	<u>00</u>	
01001110	<u>0</u>	
01000111		

Розкладання слова на множники β_3 починається з перегляду нижнього блоку простого логарифмічного підпису β_1 .

Перетворення $\rho^{-1}_2 = [11011110]$ визначає перестановку бітів у блоках слова 00011100, отримуємо $\beta_2 = 11000010$. Перетворення $\rho^{-1}_1 = [62054371]$ виконує перестановку бітів у слові 11000010, отримуємо $R = 00100011$. Результат збігається з першим словом ключа R_1 в табл. 4. L значень логарифмічних підписів визначають L факторизацій і відновлення загального ключа R_1 .

Висновок

Оцінка обчислювального часу, необхідного для реалізації криптосистеми LINE в протоколі 5G AKA, вимагає розгляду багатьох компонентів протоколу 5G. У [8] проведено часткове порівняння механізмів постквантового спрямованого шифрування – CRYSTALS-Kyber, VIKR, Classic McEliece і HQC – з традиційним ECIES на Curve 25519 і Secp256r1. Автори зосередилися на 128-бітній безпеці, залишивши невирішеною оцінку вартості переходу на 192-бітний і 256-бітний рівні.

Можливі точні прогнози операційних витрат на впровадження. Криптосистема LINE для 128-бітної безпеки може бути реалізована за допомогою 16-бітних слів: $m=16$, $L=8$, $K=16$. Розмір відкритого ключа становитиме 64 байти на логарифмічний підпис, а з урахуванням кількості масивів $K=16$ загальний розмір відкритого ключа дорівнюватиме 1024 байтам. Усі інші масиви можна згенерувати за допомогою генератора випадкових бітів. Для порівняння, криптосистема CRYSTALS-Kyber вимагає 800 байт, тоді як Classic McEliece вимагає 261120 байт.

Вартість секретних ключів для криптосистеми LINE буде дорівнювати 142 байтам, якщо використовувати однакові секретні перетворення для всіх факторизованих логарифмічних підписів, і 464 байт, якщо використовувати різні перетворення. Для порівняння, CRYSTALS-Kyber вимагає 1632 байти, а Classic McEliece – 6452 байти

Список літератури:

1. Liu F., Peng J., Zuo M. Toward a secure access to 5G network // Proceedings of the 17th IEEE Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom '18), New York, NY, USA, August 1–3, 2018. P. 1121–1128.
2. Wang Y., Zhang Z., Xie Y. Privacy-Preserving and Standard-Compatible AKA Protocol for 5G // Proceedings of the 30th USENIX Security Symposium (USENIX Security '21), Online, 11–13 August 2021; USENIX Association: Vancouver, BC, Canada, 2021. P. 3595–3612. Available online: <https://www.usenix.org/conference/usenixsecurity21/presentation/wang-yuchen>.
3. Xiao Y., Wu Y. 5G-IPAKA: An improved primary authentication and key agreement protocol for 5g networks // Information. 2022. №13. 125 p.
4. Arkko J., Norrman K., Mattsson JP Forward Secrecy for the Extensible Authentication Protocol Method for Authentication and Key Agreement (EAP-AKA'FS). Internet-Draft draft-ietf-emu-aka-pfs-11, Internet Engineering Task Force. 2023. Available online: <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-emu-aka-pfs/11/>
5. 3GPP. Security Architecture and Procedures for 5G System TS33.501 v18.2.0. Technical Report, The 3rd Generation Partnership Project. 2023. Available online: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3169>.
6. Kjøien GM The SUCI-AKA Authentication Protocol for 5G Systems. In Proceedings of the 13rd NISK Conference on Norwegian Information Security (NISK'20), Online, 23–25 November 2020. Available online: <https://ojs.bibsys.no/index.php/NIK/article/view/885>.
7. Xiao Y., Gao S. 5GAKA-LCCO: A secure 5G authentication and key agreement protocol with less communication and computation overhead // Information. 2022. №13. 257 p.
8. Mohamed Taoufiq Damir, Tommi Meskanen, Sara Ramezani & Valtteri Niemi. A Beyond-5G Authentication and Key Agreement Protocol // International Conference on Network and System Security NSS 2022: Network and System Security 07 December 2022. P. 249–264.
9. 3GPP. Authentication and Key Management for Applications (AKMA) <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3690>
10. NIST. Submission requirements and evaluation criteria for the postquantum cryptography standardization process, 2016. <https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Projects/Post-Quantum-Cryptography/documents/call-for-proposals-final-dec-2016>.
11. Gennady Khalimov, Yevgen Kotukh, Maksym Kolisnyk, Svitlana Khalimova, Oleksandr Sievierinov. LINE: Cryptosystem based on linear equations for logarithmic signatures. <https://eprint.iacr.org/2024/697.pdf>, Paper 2024/697.

12. Gennady Khalimov, Yevgen Kotukh, Maksym Kolisnyk, Svitlana Khalimova, Oleksandr Sievierinov "SIGNLINE: Digital signature scheme based on linear equations cryptosystem". <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.16227>
13. Kotukh Y., & Khalimov H. Advantages of Logarithmic Signatures in the Implementation of Crypto Primitives // Challenges and Issues of Modern Science. 2024. No 2. P. 296–299. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/119>
14. Котух Є., Халімов Г., & Коробчинський М. Побудова покращеної схеми шифрування на узагальнених Сузукі 2-групах в криптосистемі MST3 // Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка». 2023. No 2(22). P. 19–30. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.22.1930>
15. Kotukh Y., Khalimov G., Korobchynskiy M., Rudenko M., Liubchak V., Matsyuk S., & Chashchyn M. Research horizons in group cryptography in the context of post-quantum cryptosystems development // Radiotekhnika. 2024. No 216. P. 62–72. <https://doi.org/10.30837/rt.2024.1.216.05>
16. Gennady Khalimov, Yevgen Kotukh, Oleksandr Sievierinov, Svitlana Khalimova, Sang-Yoon Chang, Yaroslav Balytskyi Strong Encryption Based on the small Ree groups // International Conference "Problems of Infocommunications. Science and Technology" (PIC S&T'2022) 10 – 12 October, 2022 Proceedings, 2022. P. 439–444.
17. Khalimov, G., Kotukh, Y., Chang, S.-Y., Balytskyi, Y. Khalimova, S., Marukhnenko, O. Encryption Scheme Based on the Generalized Suzuki 2-groups and Homomorphic Encryption Communications in Computer and Information Science, 2022, 1536 CCIS. P. 59–76.
18. Khalimov G., Kotukh Y., Khalimova S., ... Marukhnenko O., Tsyplakov D. Towards advance encryption based on a Generalized Suzuki 2-groups // International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering, ICECCME 2021.
19. Khalimov G., Kotukh Y., Didmanidze I., ... Khalimova S., Vlasov A. Towards three-parameter group encryption scheme for MST3 cryptosystem improvement // Proceedings of the 2021 5th World Conference on Smart Trends in Systems Security and Sustainability. WorldS4 2021, 2021. P. 204–211.

Надійшла до редакції 03.11.2024

Відомості про авторів:

Котух Євген Володимирович – канд. техн. наук, доцент, професор кафедри кібербезпеки; Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»; Дніпро, Україна; e-mail: yevgenkotukh@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4997-620X>

Халімов Геннадій Зайдулович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри безпеки інформаційних технологій; Харківський національний університет радіоелектроніки; Харків, Україна; e-mail: hennadii.khalimov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2054-9186>

Джура Ілля Євгенович – студент 4-го курсу, Національний Авіаційний Університет; Київ, Україна; e-mail: illya773823@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5470-4479>

Хівренко Гліб Олександрович – аспірант кафедри безпеки інформаційних технологій; Харківський національний університет радіоелектроніки; Харків, Україна; e-mail: hlib.khivrenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7168-1793>

AUTOMATION AND ROBOTICS АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА РОБОТОТЕХНІКА

УДК 004.8:681.5

DOI:10.30837/rt.2024.4.219.05

О.В. ЗУБКОВ, канд. техн. наук, О.С. ЯКОВЕНКО, С.В. СТАРОКОЖЕВ, М.В. СКОРБАТЮК

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМУ АВТОМАТИЗОВАНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ПОКАЗАНЬ ГАЗОВИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ

Вступ

Останні роки характеризуються швидким розвитком систем комп'ютерного зору, які активно використовуються для контролю якості продукції, в медицині, в системах дорожнього руху, робототехніці і т.д. [1 – 4]. Завдяки методам та алгоритмам комп'ютерного зору вдається автоматизувати багато процесів та реалізувати прямий зв'язок із базами даних для логування стану систем чи параметрів. В Україні в комунальних системах використовують в основному механічні лічильники або лічильники без автоматичного передавання показань споживання населенням: газу, світла, води. Для зняття показань використовують контролерів, які переписують ці показання. Такий підхід може призводити до помилок фіксації внаслідок людського фактора чи навмисних викривлень результатів перевірки. Аналогічна ситуація із метрологічною атестацією вимірювальних лічильників, коли треба фіксувати результати протоку через лічильник газу або води. Тому для України і інших країн актуальна задача створення алгоритмів та програмного забезпечення, що дозволять автоматично розпізнавати та зберігати результати розпізнавання показань лічильників при метрологічній повірці чи при знятті показань контролером [5]. Огляд світових напрацювань з цього напрямку показав, що існуючі методи потребують вдосконалення для покращення точності розпізнавання. Метою даного дослідження є створення високоточного алгоритму розпізнавання показань лічильників газу та дослідження його ефективності.

Аналіз зображень для розпізнавання та сучасних методів розпізнавання зображень

Існує багато типів лічильників газу за принципом вимірювань: турбінні, мембранні, роторні. Зовнішній вигляд декількох екземплярів лічильників наведено на рис. 1.



Рис. 1. Зовнішній вигляд лічильників газу різних типів

Аналіз зображень зовнішнього вигляду лічильників показує, що показання відображаються у вигляді п'ятизначного числа, що відповідає кількості кубометрів та тризначного числа, що відповідає кількості літрів. Також існують лічильники із електронним дисплеєм та відображенням кількості літрів у вигляді чотиризначного числа. Фактично показання лічильника – це текстова інформація (символи від 0 до 9). Крім показань на зображенні є ще багато різної текстової інформації про тип лічильника, виробника, номер і т.д.

Для розпізнавання текстової інформації існує три основних підходи: класичний, на основі нейронних мереж глибокого навчання, на основі нейронних мереж та трансформерів.

Класичний підхід [6, 7] передбачає фільтрацію зображення для зменшення впливу шуму при поганому освітленні, адаптивне порогове перетворення для чіткого виділення контурів написів, використання контурного аналізу для виділення символів та оптичне розпізнавання символів для перетворення контурів у текстову інформацію. Хоча класичний підхід забезпечує високу швидкодію, але має низку недоліків: чутливість до умов зйомки та бліків, якості зображень, необхідність другого етапу обробки для відокремлення показань від інших написів.

Підхід на основі нейронних мереж використовує навчені нейронні мережі, що дозволяють класифікувати об'єкти на зображеннях та знаходити їх локалізацію, тобто координати обмежувальних рамок [8 – 12]. До найбільш популярних архітектур нейронних мереж з такими можливостями відносяться: Mask R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN, SSD, YOLO (You Only Look Once), DETR. Найбільшу точність розпізнавання забезпечує Mask R-CNN бо це двохпрохідний метод, що знаходить контури об'єктів, а потім їх розпізнає. Але цей метод працює дуже повільно і при використанні звичайних процесорів потребує до десятків секунд на обробку зображень. Архітектури Fast R-CNN та Faster R-CNN оптимізовані для збільшення бистротії, мають високу точність розпізнавання, але все одно не забезпечують обробки у реальному часі в силу додаткового часу на реалізацію обробки регіонів (Region Proposals). Найбільшу швидкодію забезпечують архітектури SSD та YOLO. При цьому YOLO також дає баланс між точністю та швидкістю і має версії архітектури адаптовані до роботи на апаратних платформах з обмеженою швидкістю.

Прикладом реалізації підходу на основі трансформерів є алгоритм DETR [13]. В цьому алгоритмі пріоритетом є точність розпізнавання, а не швидкість. Хоча, при цьому, він має непогані показники швидкості – кращі, ніж у Fast R-CNN, Faster R-CNN.

Ефективність розпізнавання зображень сучасними нейронними мережами характеризується рядом параметрів: TP – кількість вірно розпізнаних об'єктів, FP – кількість помилкових передбачень, FN – кількість об'єктів, які модель не знайшла, Precision – частка правильно детектованих об'єктів серед усіх передбачених, Recall – частка знайдених правильних об'єктів серед усіх справжніх об'єктів, IoU – міра порівняння області передбаченого об'єкта з реальною анотацією, mAP – середня точність для різних значень порогів Intersection over Union (IoU) [14, 15]. При навчанні Precision та Recall розраховуються для різних значень порогів IoU за формулами (1) та (2) та будується PR крива:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (1)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (2)$$

Усереднене значення Precision розраховується, як площа під PR кривою. Значення mAP розраховується, як середнє значення AP для всіх класів за формулою (3). Розрахунок зазвичай ведеться для діапазону порогів IoU від 0,5 до 0,95.

$$mAP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AP_i, \quad (3)$$

де N – кількість класів.

Аналіз багатьох наукових публікацій і Internet ресурсів з оцінок ефективності роботи різних нейронних мереж дозволив створити об'єднану таблицю показників ефективності та характеристик мереж (табл. 1).

Таблиця 1

Архітектура	Швидкодія на RTX3090, FPS	Розмір моделі, Мбайт	Точність mAP ₅₀₋₉₅ , %	Кількість параметрів x 10 ⁶
Mask R-CNN	5-7	180	50-60	44
Fast R-CNN	6-9	150	45-60	23
Faster R-CNN	7-10	160-190	40-60	41
SSD512	20-40	13-140	30-45	24
YOLOv8-11	30-120	4-190	40-58	1.85-68
DETR	5-10	140-200	40-60	41

У табл. 1 наведена інформація про швидкодію роботи нейронних мереж у кількості зображень за секунду (FPS) для відео карти RTX3090, розмір файлу моделі, кількості параметрів в моделі та точності розпізнавання моделі після навчання на стандартних датасетах COCO. Аналіз даних табл. 1 показує, що архітектура SSD512 значно програє іншим архітектурам по точності, а кращі архітектури за точністю (Mask R-CNN, Faster R-CNN) працюють достатньо повільно, мають великий об'єм моделі та потребують для реалізації значних апаратних ресурсів. Найкращим варіантом для практичної реалізації є застосування алгоритма YOLO останніх версій починаючи із восьмої. Архітектура YOLO є достатньо гнучкою і має 5 різновидів: n,s,m,l,x, що орієнтовані, як на прості апаратні платформи типу Raspberry PI (моделі n та s) чи мобільні телефони (моделі s та m), так і на використання GPU (моделі s-x). Ці модифікації відрізняються кількістю ядер в кожному із загорткових шарів та складністю інших блоків. Невелика кількість параметрів моделей, від 2 мільйонів, дозволяє реалізувати мережу на невеликому об'ємі оперативної пам'яті, а висока точність дає можливість ефективного розпізнавання. Аналізуючи інформацію компанії розробника архітектури YOLO з сайту <https://ultralytics.com/> для подальших досліджень була обрана архітектура YOLOv10s. При найменшій кількості параметрів (7.2 мільйона) ця архітектура забезпечує точність розпізнавання mAP=47 %.

Для розпізнавання показань газових лічильників необхідно підготувати датасет зображень різних лічильників та навчити нейронну мережу YOLOv10s з використанням цього датасету. Відповідно до рекомендацій, викладених в [8 – 11, 14, 15], для якісного навчання необхідно мати не менше 300 зображень кожного класу. В нашому випадку є 10 класів об'єктів – цифри від 0 до 9. Тоді загальна кількість зображень цифр на лічильниках повинна бути не менше 3000. Виходячи з того, що на одному зображенні лічильника є 8 цифр, в датасеті повинно бути не менше 375 фото лічильників. Існує багато Інтернет ресурсів готових датасетів. Серед них можна відмітити: Kaggle, RoboFlow, TensorFlow Datasets, Google Dataset Search і т.д. У датасетах ресурса Kaggle є лише зображення окремих цифр, що не дозволяє при навчанні та розпізнаванні тренувати мережу з локалізації положення цифр на зображенні лічильника. Датасети ресурсу RoboFlow повністю задовольняють потребам алгоритму YOLO при навчанні: містять безпосередньо зображення лічильників різних типів та виробників, зроблених в різних умовах зйомки (різне освітлення, світлові блики), розмір кожного зображення 416x416 пікселів. В результаті об'єднання знайдених датасетів, було створено датасет, що містить 1142 зображення лічильників відомих світових виробників для навчання, 342 – для валідації та 171 – для тестування. Частина датасету для навчання також була доповнена 52 зображеннями лічильників українських виробників. Далі всі зображення були анотовані з використанням програми LabelImage. При анотуванні кожна цифра показань виділяється обмежувальною рамкою, на кожне зображення лічильника створюється текстовий файл з переліком класів об'єктів та координатами обмежувальних рамок.

Навчання архітектури YOLOv10s та аналіз результатів навчання

Для навчання використовувалась бібліотека ultralytics та переднавчена модель yolov10s, в якій вихідний шар із 80 нейронами замінений на шар із 10 нейронів, кількість яких відповідає кількості класів об'єктів, що треба розпізнавати. Навчання запускається викликом метода train. При виклику цього метода були задані наступні параметри: кількість епох навчання –

300, розмір батча – 16 зображень, можливі нахили зображень перед подачею на нейронну мережу – до $\pm 8^\circ$, оптимізатор – RMSProp. При навчанні кожна епоха завершується тестуванням на валідаційному датасеті для оцінювання оптимальності параметрів моделі та розрахунку параметрів результатів навчання, що обчислюються за формулами (1) – (3). При досягненні найбільшого значення mAP_{50-95} зберігається досягнута оптимальна сукупність параметрів моделі. По завершенню 300 епох навчання було досягнуто високу ефективність розпізнавання: Precision=99,5 %, Recall=99,7 %, $mAP=99,3$ %. Також на рис. 2, а наведена матриця помилок результатів навчання, що демонструє по діагоналі імовірності вірного розпізнавання 10 класів, а також імовірності помилок розпізнавання класів та фону.

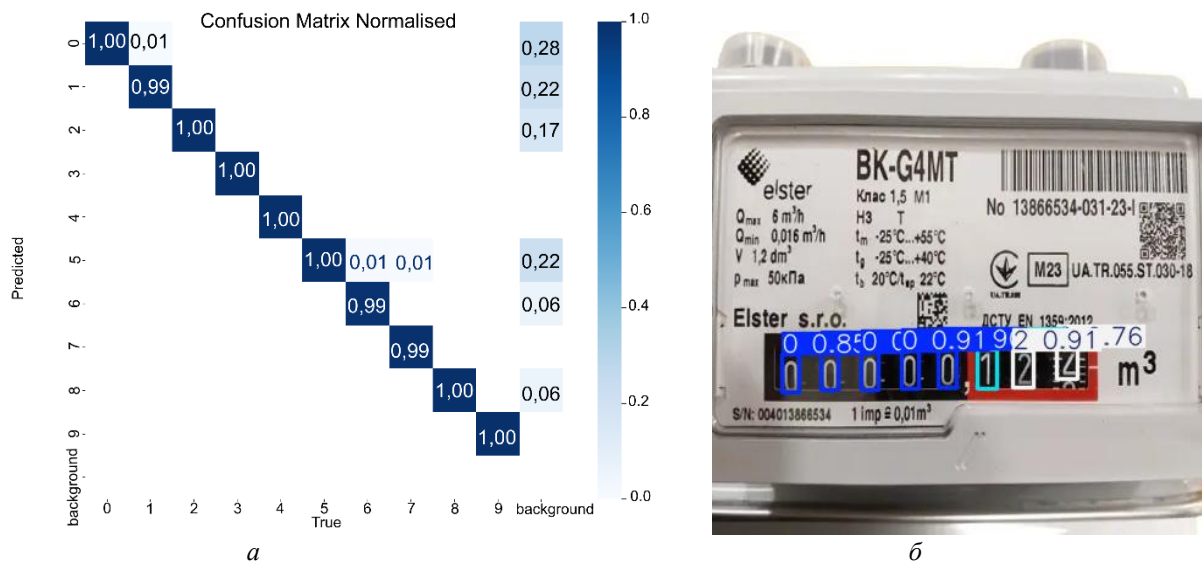


Рис. 2. Матриця розпізнавання цифр та приклад розпізнавання показань лічильника

В результаті навчання формується сукупність обмежувальних рамок, що завдана координатами цих рамок, номери класів розпізнаних цифр, що співпадають із самими цифрами та значення конфіденційності, що характеризують достовірність розпізнавання та локалізації. На рис. 2, б наведено приклад результату розпізнавання з обмежувальними рамками.

Як можна побачити з даних рис. 2, а імовірності розпізнавання 10 класів достатньо високі від 0,99 до 1. Однак також можна побачити високі імовірності розпізнавання фрагментів фону, як цифр показань лічильника. Це пов'язано із наявністю значної кількості цифрової інформації на лицьовій панелі лічильників. Аналіз результатів розпізнавання, наприклад, рис. 2, б, показує, що сформований масив обмежувальних рамок та класів об'єктів, що відповідають цим рамкам, є не відсортованим за горизонтальними координатами обмежувальних рамок. Тому, в прикладі рис. 2, б, послідовність даних в масиві містить не реальну кодову комбінацію, а код 20001200. Аналіз результатів розпізнавання інших зображень лічильників показує, що кількість обмежувальних рамок може бути більше 7, коли фрагменти фону розпізнаються помилково, як цифри лічильника. Також існують випадки помилкового розпізнавання цифр лічильника. В результаті аналізу тестової частини датасету була отримана імовірність вірного розпізнавання цифр лічильника 0,95.

Вдосконалення алгоритму розпізнавання

Отримані результати показують, що використання стандартного алгоритму YOLOv10s недостатньо для отримання достовірних результатів розпізнавання і потрібно додати вторинну обробку результатів розпізнавання. У вторинній обробці було реалізовано аналіз координат обмежувальних рамок. На першому етапі виконувалось сортування масиву обмежувальних рамок за їх горизонтальними координатами. Таким чином, наприклад, для рис. 2, б, була отримана реальна послідовність символів 00000122. Також було додано аналіз вертикальних

координат обмежувальних рамок. Як можна побачити з рис. 2, б, центри усіх обмежувальних рамок знаходяться вздовж однієї лінії з невеликим відхиленням кожного з центрів. Аналіз результатів розпізнавання валідаційної та навчальної частин датасету показала, що середньоквадратичне відхилення вертикальної координати центрів обмежувальних рамок від лінії дорівнює $\sigma=1,9$ пікселя. На основі цих даних з масиву обмежувальних рамок видаляються ті, у яких вертикальне відхилення центрів від лінії перевищує 3σ , тобто 6 пікселів. Після введення сортування та видалення зайвих рамок вдалось підвищити імовірність вірного розпізнавання до 0,99. Але це, все одно, означає, що помилки можливі при невірному розпізнаванні цифр і є необхідність зменшити імовірність помилок.

У зв'язку з тим, що для навчання використовувався великий датасет, втричі більший за мінімально потрібний для алгоритму YOLO, намагалися покращити модель за рахунок збільшення розміру датасету немає сенсу. Тому у вторинну обробку було додано альтернативне розпізнавання зображень під обмежувальними рамками за допомогою розробленої нами згорткової нейронної мережі [16, 17]. На вхід розробленої загорткової мережі подається зображення з висотою 32 пікселя та шириною 16. Такий розмір обрано на основі статистичного аналізу сукупності обмежувальних рамок цифр в зображеннях лічильників в тренувальній та валідаційній частинах датасету. Структура розробленої загорткової нейронної мережі показана на рис. 3.

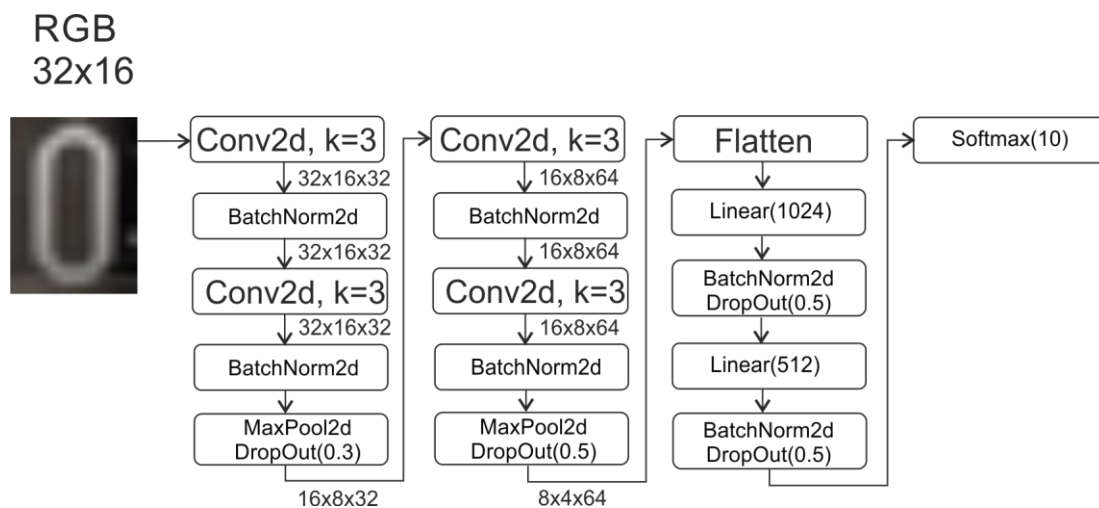


Рис. 3. Структура розробленої згорткової нейронної мережі

На вхід нейронної мережі подаються трьохкольорові зображення з розмірами 32x16 пікселів. В загортковому шарі Conv2d виконується згортка з 32 ядрами 3x3 і, в результаті, маємо 32 карти ознак. Використовується функція активації ReLU. Для прискорення навчання та стабілізації вагів мережі додано шар BatchNorm2d. Далі повторюються згортковий та нормалізаційний шари. Після них розміри карт зменшуються вдвічі завдяки MaxPool2d шару. Також для запобігання перенавчанню додано шар Dropout, що випадково обнуляє ваги мережі. В результаті маємо 32 карти ознак з розмірами 16x8. Далі описана послідовність блоків повторюється з 64 ядрами і ми маємо 64 карти ознак з розмірами 8x4. Після згорткових шарів йде повнозв'язна мережа, що складається із шарів Linear по 1024 і 512 нейронів, а також вихідний шар для класифікації Softmax, що має 10 виходів. Для переходу від двомірних карт ознак до векторної структури входів повнозв'язної мережі використовується шар Flatten. Реалізація мережі була виконана на PyTorch.

Розроблена нейронна мережа була навчена з використанням навчальної частини датасету. В результаті перевірки навченої моделі на валідаційній частині датасету були отримані наступні результати: Precision=99,1%, Recall=99,2%, mAP=98,8%. Ці результати дещо поступаються результатам навчання моделі YOLO, що пояснюється більш простою структурою нейронної мережі.

Вдосконалений алгоритм було використано на тесовій частині датасету. Рішення про вірний результат розпізнавання робився при умові, що обидві нейронних мережі показали однаковий результат класифікації і значення конфіденційності в алгоритмі YOLO не менше 0,75, а значення на виході розробленої нейронної мережі для цього класу не нижче 0,9. При цих параметрах вдалось виявлять усі невірні розпізнані цифри однією з мереж. У випадку неспівпадання результатів розпізнавання двох нейронних мереж пропонується робити новий фотознімок та повторювати процес розпізнавання для отримання достовірних даних.

Висновки

1. Проведено аналіз сучасних методів розпізнавання зображень для вирішення проблеми автоматизованого розпізнавання показань газових лічильників. Для розпізнавання обрано найновітнішу архітектуру YOLOv10s, що забезпечує компроміс між точністю розпізнавання та роботою у реальному часі, у порівнянні з іншими методами та архітектурами нейронних мереж.

2. Для навчання архітектури YOLOv10s розроблено датасет на основі існуючих Internet ресурсів та фото українських виробників лічильників. З використанням розробленого датасету було виконано навчання YOLOv10s та тестування навченої нейронної мережі. Результати навчання показали високу ефективність розпізнавання на тестовому датасеті (mAP=99,3 %), але не забезпечили 100 % розпізнавання показань.

3. Для покращення результатів розпізнавання було створено алгоритм, за яким на другому етапі обробки виконувалось селектування обмежувальних рамок за горизонтальними та вертикальними координатами. Це дозволило видалити рамки, що відповідали помилковому розпізнаванню фрагментів фону, як показань лічильника, а також дозволило отримати дійсну послідовність цифр показань.

4. Також у алгоритм вторинної обробки результатів розпізнавання було додано аналіз локалізацій цифр після YOLOv10s за допомогою альтернативної розробленої загорткової нейронної мережі. Ця мережа також була навчена за допомогою створеного навчального датасету і показала високу ефективність розпізнавання (mAP=98,8 %). Результати сумісного розпізнавання обома нейронними мережами дозволили визначити ті зображення, що містять недостовірні випадки розпізнавання. Запропоновано алгоритм з повторенням фотографування та розпізнавання показань в таких випадках.

Список літератури:

1. Shelke S., Pathak I.S., Sangai A.P., Lunge D. A Review Paper on Computer Vision // International Journal of Advanced Research in Science Communication and Technology. Deli. 2023. Vol.3, Iss.2. P.1–4. DOI:10.48175/IJARST-8901
2. Dong S., Wang P., Abbas K. A survey on deep learning and its applications// Computer Science Review. Amsterdam. 2021. Vol.40, Iss.C. P.1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100379>
3. Mahadevkar S.V. A Review on Machine Learning Styles in Computer Vision – Techniques and Future Directions // IEEE Access. Piscataway. 2022. Vol.10. P.1-37. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3209825
4. Chai J., Zeng H., Li A., Ngai E.W.T. Deep learning in computer vision: A critical review of emerging techniques and application scenarios. Machine Learning with Applications. Amsterdam. Vol. 6. 2021. P.1–13. DOI:10.1016/j.mlwa.2021.100134
5. Tarhib S., Tanha J., Imanzadeh S., Hassanzadeh S. Multi Model CNN Based Gas Meter Characters Recognition // 13th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE). IEEE: Mashhad, Iran. 2023. P.1–7. DOI:10.1109/ICCKE60553.2023.10326299
6. Wang J. A Study of The OCR Development History and Directions of Development // Highlights in Science Engineering and Technology. Milan. 2023. Vol.72. P.409–415. DOI:10.54097/bm665j77
7. Kaur R., Singh E.R. Image Filtering Techniques-A Review // International journal of advance research in science and engineering. Deli. 2017. Vol.6, Iss. 8. P.1–6. DOI:10.23956/ijarcsse/V7I6/0105
8. Hassam T., Muhammad S. K., Muhammad O. T. Performance Analysis and Comparison of Faster R-CNN, Mask R-CNN and ResNet50 for the Detection and Counting of Vehicles // 2021 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems, Greater Noida, India, 19–20 February 2021. Piscataway, NJ: IEEE, 2021. P. 587–594. DOI:10.1109/ICCCIS51004.2021.9397079

9. Mukaram S., Nizar Z., Mahmoud M. An Improved YOLOv8 to Detect Moving Objects // IEEE Access. Piscataway. 2023. Vol. 11. P. 1–25. DOI:10.1109/ACCESS.2024.3393835
10. Muhammad H. YOLO-v1 to YOLO-v8, the Rise of YOLO and Its Complementary Nature toward Digital Manufacturing and Industrial Defect Detection // Machines. 2023. Vol. 11, Iss. 7. P. 1–25. DOI:10.3390/machines11070677
11. Yixiao Z., Yuanming G., Xiaolong C. Research on YOLOv5 Vehicle Detection and Positioning System Based on Binocular Vision // World Electric Vehicle Journal. Basel. 2024. Vol. 15, Iss.2. P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/wevj15020062>
12. Cao J. and oth. Front Vehicle Detection Algorithm for Smart Car Based on Improved SSD Model // Sensors. Basel. Vol. 20. 2020. P.1–21. DOI:10.3390/s20164646
13. Choi H.K., Paik C.K. Recurrent DETR: Transformer-based Object Detection for Crowded Scenes // IEEE Access. Piscataway. Vol. 4. 2023. P. 1–21. DOI:10.1109/ACCESS.2023.3293532
14. Zubkov O., Sheiko S., Oleynikov V., Kartashov V., Babkin S. Investigation Of The Yolov5 Algorithm Efficiency For Drone Recognition // Telecommunications and Radio Engineering. Redding. 2024. Vol.83, Iss.1. P.65–79. DOI:10.1615/TelecomRadEng.2023048987
15. Jung H.K., Choi G.S. Improved YOLOv5: Efficient Object Detection Using Drone Images under Various Conditions // Appl. Sci. Basel. 2022. Vol. 12. P.1–16. DOI: 10.3390/app12147255
16. Illia Oleksiienko, Dat Thanh Tran, Alexandros Iosifidis. Variational Neural Networks implementation in Pytorch and JAX // Software Impacts. Amsterdam. 2022. Vol.14. P.1–8. <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2022.100431>
17. Zebin T., Scully P.J., Peek N., Casson A. Design and Implementation of a Convolutional Neural Network on an Edge Computing Smartphone for Human Activity Recognition // IEEE Access. Piscataway. Vol. 8. 2019. P. 1–11 DOI:10.1109/ACCESS.2019.2941836

Надійшла до редколегії 02.10.2024

Відомості про авторів:

Зубков Олег Вікторович – канд. техн. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Україна; e-mail: oleh.zubkov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8528-6540>

Яковенко Олександр Сергійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Україна; e-mail: oleksandr.iakovenko@nure.ua

Старокожев Святослав Валерійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Україна; e-mail: sviatoslav.starokozhev@nure.ua

Скорбатюк Максим Володимирович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Україна; e-mail: maksym.skorbatiuk@nure.ua

А.А. СОКОЛОВ, О.Г АВРУНІН, д-р техн. наук

ВИКОРИСТАННЯ БІБЛІОТЕКИ ARCORE ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ХМАРИ КЛЮЧОВИХ ТОЧОК У НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Вступ

Сліпота та серйозні порушення зору створюють безліч труднощів у повсякденному житті, включаючи орієнтацію у просторі та уникнення перешкод для людей з обмеженими можливостями. Такі проблеми значно обмежують незалежність незрячих людей, особливо в незнайомому середовищі. Вирішення цих завдань має глибокий вплив на суспільство, починаючи від підвищення рівня безпеки та комфорту незрячих людей і закінчуючи позитивним ефектом на економіку, зокрема через інтеграцію таких осіб у соціальні та трудові процеси [1].

Сучасні технології відкривають нові перспективи для вирішення цих проблем. Зокрема, комбінація алгоритмів SLAM та нейронних мереж створює передумови для розробки ефективних навігаційних систем. Такі системи здатні значно полегшити орієнтацію в просторі, автоматизуючи процеси аналізу середовища, і тим самим повністю або частково вирішити ключові проблеми, з якими стикаються незрячі люди [2, 3]. Прикладом подібного рішення є Seeing AI від Microsoft.

Архітектура навігаційної системи. Основні принципи

Створення ефективної навігаційної системи для незрячих людей вимагає врахування їх матеріальних можливостей та доступності компонентів кінцевого продукту. На жаль, у сучасних умовах більшість незрячих людей в Україні не має високого рівня матеріального забезпечення. Це вимагає розробки технологій на основі максимально доступних і масових апаратних засобів, які не потребують значних фінансових витрат.

Враховуючи це, ми пропонуємо використовувати сучасний смартфон як основний обчислювальний модуль системи. Смартфони мають достатній рівень продуктивності для реалізації алгоритмів одночасної локалізації і побудови карти (SLAM) та інференсу нейронних мереж. Крім того, смартфон є поширеним пристроєм, яким вже володіє велика кількість людей, включаючи незрячих.

Запропонована концепція передбачає інтеграцію нейронної мережі та SLAM-алгоритмів для створення навігаційного пристрою, здатного аналізувати оточення через камеру смартфона, обробляти дані локально та передавати їх на тактильний модуль через Bluetooth. Такий підхід забезпечує компактність і доступність кінцевого продукту, що є ключовими факторами для розширення його застосування [4, 5].

Система також передбачає класифікацію перешкод за типами, що дозволяє інформувати користувача про небезпечні об'єкти, такі як автомобілі чи тварини, а також визначати важливі елементи інфраструктури, наприклад світлофори, пішохідні переходи чи пошкодження дорожнього покриття. Це підвищує рівень безпеки та зручності користувача, сприяючи його незалежності та інтеграції в суспільство.

Для реалізації тактильного модуля передбачається використання доступного мікроконтролера з підтримкою Bluetooth, наприклад, ESP32 [6 – 8]. Такий модуль забезпечуватиме тактильний зворотний зв'язок із користувачем через компактну матрицю вібромоторів. Інформація про відстань до перешкод та їх тип буде передаватися у формі тактильних сигналів різної інтенсивності, частоти або патернів, що дозволить користувачу швидко орієнтуватися в просторі.

Таким чином, запропонована система має потенціал значно спростити процес навігації для незрячих людей, зберігаючи її доступність і функціональність, а також забезпечити незалежність користувача за рахунок використання масових і недорогих компонентів.

Загальні принципи роботи ARCore

ARCore – це пропрієтарна технологія і повний алгоритм якої невідомий, хоча і ґрунтується на відомих методах. Основними є методи візуальної одометрії, оцінки переміщення на основі IMU і нейронної мережі, що зменшує накопичення помилки від IMU. Остання є пропрієтарною розробкою Google. Приблизний алгоритм роботи ARCore запропонований на рис. 1. Розглянемо основні технології більш детально[9,10].

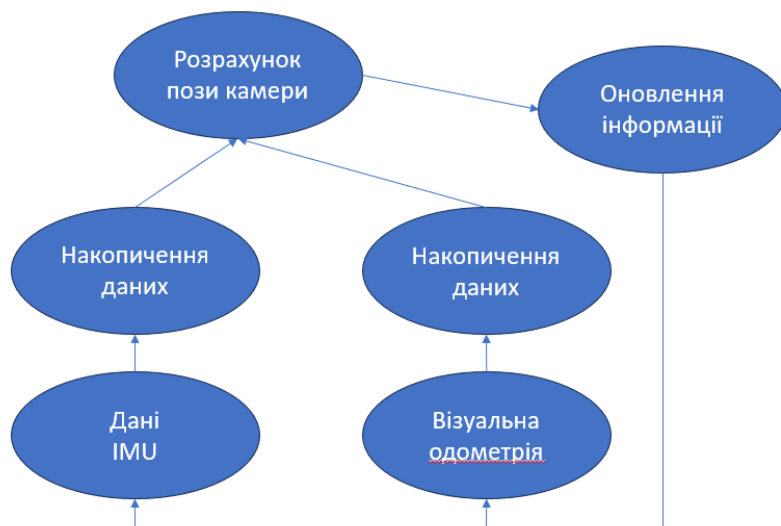


Рис. 1. Алгоритм роботи ARCore

Основна ідея візуальної одометрії полягає в зіставленні зображень: ми повинні знайти ключові точки, які можна знайти на інших зображеннях. Ключові точки, це щось, що має унікальні характеристики, наприклад, кут, сильний градієнт, лінія і таке інше. Можна виділити чотири основні етапи:

1. Вилучення особливостей: У кожному кадрі зображення виявляються і відстежуються ключові точки. Зазвичай використовують такі алгоритми як SIFT, SURF, ORB.

2. Відповідність особливостей: Особливості між послідовними кадрами порівнюються, щоб визначити, як вони зміщуються щодо один одного.

3. Визначення руху: на основі цих відповідностей обчислюється відносний рух камери між кадрами.

4. Оновлення траєкторії: Інтегрування послідовних відносних рухів для оцінки повної траєкторії.

Інерційна одометрія – це алгоритм оцінки положення та орієнтації об'єкта (наприклад, камери, робота або транспортного засобу) з використанням даних від інерційних вимірювальних пристроїв (IMU), таких як акселерометри та гіроскопи. Основна ідея – інтеграція показань IMU для відстеження переміщень та поворотів об'єкта з часом.

Алгоритм роботи інерційної одометрії:

1. Збір даних з IMU: акселерометри вимірюють лінійне прискорення a , гіроскопи вимірюють кутову швидкість ω .

2. Калібрування IMU: коригування зсувів та шумів у показаннях IMU.

3. Обробка даних: видалення гравітаційного компонента з показань акселерометра, інтеграція кутової швидкості визначення орієнтації, інтеграція прискорень визначення швидкості і становища.

4. Корекція помилок.

Поєднавши дані від інерційної та візуальної одометрії, ми отримуємо інформацію про рух, яку зможемо використовувати у подальшій роботі. Для поєднання даних зазвичай використовують алгоритми двох груп. Це фільтр Калмана та група алгоритмів VINS-MONO (монокулярна візуальна інерційна система) [10, 11].

Алгоритм отримання хмари ключових точок засобами ARCore

Хмару ключових точок засобами ARCore можна отримати за допомогою декількох методів з різною точністю. В рамках задачі побудови навігаційної системи найбільш цікавими є хіт тест та прямий запит хмари ключових точок. Характерною особливістю ключових точок отриманих засобами ARCore є те, що ці точки представлені у світових координатах. Програмно ми можемо отримати поточну позу камери, і визначити відстань від камери до точки [12], рис 2.

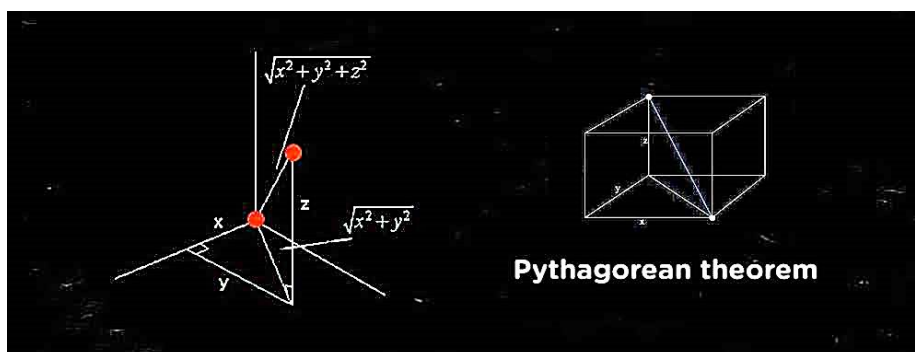


Рис. 2. Принцип визначення відстані

Метод `Frame.acquirePointCloud()` в ARCore надає хмару точок [13], які є набором 3D-координат, що визначають структуру оточення. Ці точки генеруються на основі аналізу зображень, сигналів з камери пристрою та алгоритмів виявлення зовнішніх подій. Кожна точка містить координати у світовій системі (x, y, z) та рівень впевненості (довірливість), який показує, що ARCore дійсно точно визначив цю точку.

Хмара точок оновлюється миттєво, що дозволяє отримувати актуальні дані під час руху камери. Цей метод застосовується для розуміння просторової структури сцени, але має обмеження пов'язані з довірливістю. Кількість залежить від багатьох факторів, таких як освітлення та текстурність кадру. На практиці ми отримували близько 10 – 20 у приміщенні зі штучним освітленням та 100–250 для вуличних кадрів днем, у похмуру погоду.

Хіт-тести (`Frame.hitTest(x, y)`) надають можливість визначати 3D-координати точок на об'єктах сцени, використовуючи віртуальний промінь, спрямований з екрана пристрою. Цей метод особливо корисний для взаємодії з користувачем, наприклад, щоб визначити місце торкання поверхні в доповненій реальності. Результатом хіт-тесту є точки перетину променя з розпізнаними площинами, відстежуваними точками або віртуальними об'єктами. Кожна така точка включає позицію (Pose) і додаткову інформацію про тип поверхні. Хіт-тести підходять для завдань точної взаємодії з віртуальним середовищем, але працюють тільки в зонах, де ARCore виявив фізичні поверхні чи об'єкти. Зазвичай, їх кількість у кадрі невелика, менше 13, тому їх застосування для задач навігації ускладнено та дуже ситуативно.

Оскільки засоби ARCore дозволяють отримати матриці проєкції та виду, ми можемо перетворити знайдені ключові точки зі світових координат в нормалізовані координати. Це знадобиться для візуалізації даних та в подальшому буде використовуватися нейронною мережею для розпізнавання об'єктів. Алгоритм наведено на рис. 3.

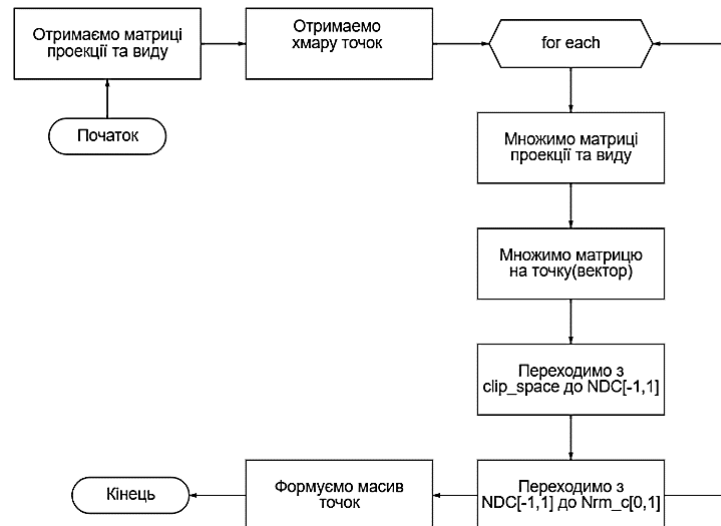


Рис. 3. Алгоритм отримання хмари ключових точок

Розглянемо необхідні перетворення. За допомогою методів `getProjectionMatrix` та `getViewMatrix` отримуємо програмними засобами матриці проєкції та виду. Виконавши множення, переходимо у `clip space`(1). Це проміжний координатний простір у графічному пайплайні рендерингу[11], який використовується у комп'ютерній графіці та обробці 3D-сцен.

$$ClipPosition = projMatrix \times ViewMatrix \times (PointPose, 1)^T, \quad (1)$$

де $PointPose^T$ – координати точки у світових координатах; $ViewMatrix$ – матриця виду для поточного кадру; $projMatrix$ – матриця виду для поточного кадру; $ClipPosition$ – координати точки у `clip space`.

Наступним кроком переходимо до NDC (нормалізованих координат пристрою). Координати у просторі відсікання (`clip space`) виражені у вигляді 4D-вектора. Щоб отримати нормалізовані координати пристрою, необхідно виконати перспективне ділення (2). В результаті цього кроку `ndcX` та `ndcY` будуть у діапазоні від -1 до 1:

$$ndcX = \frac{clipX}{clipW}, ndcY = \frac{clipY}{clipW}, \quad (2)$$

Далі залишилося лише перетворити нормалізовані координати пристрою на нормовані координати. Це можна зробити наступним чином(3).

$$Norm_x = \frac{NDC_x + 1}{2}, Norm_y = \frac{NDC_y + 1}{2}, \quad (3)$$

Тепер отримані дані можливо візуалізувати. Для цього збережемо отримані дані у форматі текстового файлу з координатами і відстанями у метрах та відповідного зображення.

Візуалізація та аналіз отриманих даних

Для візуалізації отриманих даних ми використаємо мову пайтон, і також застосуємо YOLOv11n для детекції об'єктів у кадрі [14]. Для відрисовки рамок знайдених об'єктів застосуємо OpenCV [15]. Таким чином, ми зможемо оцінити, як дані будуть розмішуватись та скільки ключових точок потрапить на знайдений об'єкт. Проаналізуємо отримані результати, що зображені на (рис. 4). При цьому використовувалася стандартна модель, та у подальшому буде необхідно за допомогою переносу навчання адаптувати модель до задач навігації. Аналізуючи дані, ми бачимо багато викидів та не дуже високу точність.



Рис. 4. Приклади вуличних кадрів

Тому для отриманих результатів має сенс у подальшій роботі застосувати алгоритми для зменшення впливу викидів та покращення точності даних. Одним із ефективних підходів є використання кластеризаційних алгоритмів, таких як DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise). Цей алгоритм дозволяє знаходити щільно згруповані ключові точки та відсікати точки, які є шумом або не належать до жодного кластеру. Його перевагою є здатність працювати без попереднього визначення кількості кластерів і ефективно виявляти вибірки навіть у складних умовах.

Іншим перспективним підходом є використання фільтрації даних на основі локального фактора вибивання (LOF – Local Outlier Factor), який дозволяє оцінити, наскільки точка є вибиванням відносно своїх найближчих сусідів. Цей метод особливо ефективний у випадках, коли дані мають нерівномірний розподіл.

Окрім того, для покращення стабільності та зменшення шуму в даних можна використувати фільтр Калмана, який добре підходить для роботи з послідовними даними. Цей підхід дозволяє прогнозувати положення точки, згладжуючи її траєкторію, та відсікати точки, які сильно відхиляються від очікуваного значення.

У рамках подальших досліджень планується комбінувати зазначені підходи для оптимального оброблення даних. Це дозволить зменшити похибки, підвищити якість отриманих даних та покращити загальну ефективність навігаційної системи. Реалізувати такий підхід можна на сучасній мікроконтролерних стендах [16, 17] для вивчення принципів роботи оптичних навігаційних систем різного призначення [18, 19].

Висновки

Запропоновано концепцію навігаційної системи для незрячих людей, яка базується на використанні сучасних технологій доповненої реальності, зокрема ARCore. Система поєднує алгоритми SLAM, нейронну мережу та смартфон як основний обчислювальний модуль, що забезпечує її доступність та практичність.

Експериментальні результати показали, що кількість ключових точок значно залежить від умов освітлення та текстурності сцени. Отримані результати потребують подальшої обробки для зменшення викидів і підвищення точності.

Подальші дослідження будуть спрямовані на оптимізацію алгоритмів обробки хмари точок для зменшення кількості викидів, розробку та навчання адаптованих нейронних мереж, здатних точніше класифікувати перешкоди та важливі об'єкти, інтеграцію з тактильними модулями для покращення зворотного зв'язку з користувачем, експериментальну перевірку системи в реальних умовах експлуатації, зокрема на вулиці та у складних середовищах, для підвищення її ефективності та надійності.

Список літератури:

1. World Health Organization: WHO. Blindness and vision impairment. Who. int, Oct. 11, 2018. <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>
2. Microsoft, "Seeing AI," Microsoft Garage. <https://www.microsoft.com/en-us/garage/wall-of-fame/seeing-ai/>
3. "Design principles – Wayfindr – Open Standard," Wayfindr, 2015. <https://www.wayfindr.net/open-standard/designing-for-vision-impaired-people/design-principles> (accessed Jan. 24, 2025).
4. Sokolov A., Avrunin O., Selivanova K. and Shushliapina N. Application of Augmented Reality Technologies for Determining Distances in Navigation System for the Blind // 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Oct. 2024, pp. 530–533. doi: <https://doi.org/10.1109/tcset64720.2024.10755743>.
5. Sokolov A., Avrunin O. Evaluation of ARCORE library capabilities for determining the distance to objects in the frame // Optoelectronic Information-Power Technologies. 2024. Vol. 47, no. 1. P. 58–65. doi: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-47-1-58-65>.
6. Pastukh V., Andrushchak V., Beshley M., Klymash M., and Vdovychenko V. DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT NAVIGATION AND SPATIAL ORIENTATION SYSTEM FOR PEOPLE WITH VISUAL IMPAIRMENTS // Information and communication technologies electronic engineering. 2023. Vol. 3, no. 1. P. 53–63. doi: <https://doi.org/10.23939/ictee2023.01.053>.
7. Tymkovych M. et al. 3D scanning technologies by optical RealSense cameras for SIREN-based 3D hand representation. Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.1117/12.3022737>.
8. Tymkovych M., Avrunin O., Selivanova K., Kolomiets A., Bednarchyk T., and Saule Smailova. Correspondence matching in 3d models for 3d hand fitting // Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska. 2024. Vol. 14, no. 1. P. 78–82. doi: <https://doi.org/10.35784/iapgos.5498>.
9. Use the ARCore Depth API for immersive augmented reality experiences // Google Codelabs. <https://codelabs.developers.google.com/codelabs/arcore-depth/#0>
10. How Visual Inertial Odometry (VIO) Works // Welcome to The Library!, Apr. 03, 2024. <https://www.thinkautonomous.ai/blog/visual-inertial-odometry/>.
11. Computer Vision: Algorithms and Applications. 2nd ed. szeliski.org. <https://szeliski.org/Book/>
12. 47billion, Distance Measurement on Mobile App using ARCore," 47Billion, May 19, 2021. <https://47billion.com/blog/distance-measurement-on-mobile-app-using-arcore/>.
13. Frame. Google for Developers, 2024. <https://developers.google.com/ar/reference/java/com/google/ar/core/Frame#acquirePointCloud>.
14. Ultralytics, "Predict," docs.ultralytics.com. <https://docs.ultralytics.com/modes/predict/#inference-sources>
15. OpenCV: Drawing Functions in OpenCV. docs.opencv.org. https://docs.opencv.org/4.x/dc/da5/tutorial_py_drawing_functions.html
16. Avrunin O.G. Experience of Developing a Laboratory Base for the Study of Modern Microprocessor Systems / O.G. Avrunin, T.V. Nosova, V.V. Semenets // Proceedings of I International Scientific and Practical Conference «Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs» MC&FPGA-2019, Kharkiv, Ukraine, 2019. P. 6–8.
17. Avrunin O., Sakalo S., Semenets V. Development of up-to-date laboratory base for microprocessor systems investigation // 2009 19th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. Sevastopol, 2009. P. 301–302.
18. Оцінка можливостей бібліотеки ARCORE для визначення дистанції до об'єктів у кадрі / А. А. Соколов, О. Г. Аврунін // Опт-ел. інф-енерг. техн. 2004. Вип. 47, № 1. С. 58–65. DOI: 10.31649/1681-7893-2024-47-1-58-65.
19. Оцінка показників стереоендоскопічних систем в ринології / А.Соколов, О. Аврунін, Л. Коваль, О. Кадук // Опт-ел. інф-енерг. техн. Вип. 47, №. 1. С. 128–139. DOI: 10.31649/1681-7893-2024-47-1-128-139.

Надійшла до редколегії 23.10.2024

Відомості про авторів:

Соколов Андрій Андрійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри біомедичної інженерії; Україна; e-mail: andrii.sokolov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8087-698X>

Аврунін Олег Григорович – д-р техн. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідуючий кафедрою біомедичної інженерії; Україна; e-mail: oleh.avrunin@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6312-687X>

А.П. ШАМРАЙ, І.Є. КОНДРАШОВ

**АНАЛІЗ ЗОНДУВАЛЬНИХ СИГНАЛІВ СИСТЕМ
РАДІОАКУСТИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ
В ФУНКЦІОНАЛЬНОМУ ПРОСТОРИ**

Вступ

Системи радіоакустичного зондування (РАЗ) атмосфери забезпечують отримання інформації про стан процесів, що відбуваються в нижніх шарах атмосфери. Вони дозволяють вимірювати вертикальні профілі температури атмосфери та швидкості вітру [1 – 5]. Отримана інформація використовується в прикладних задачах для забезпечення зльоту та посадки літальних апаратів, прогнозування погоди, вивчення атмосферних процесів [1, 2]. Протягом декількох десятиріч розвивається теорія радіоакустичного зондування атмосфери, системи РАЗ розробляються рядом фірм і пропонуються на ринок [6 – 8], однак до цього часу не вдалося подолати низку недоліків, які суттєво обмежують можливості систем РАЗ на практиці [4, 9, 10]. Розвиток теоретичних і практичних аспектів створення і використання систем РАЗ [1, 2, 11] не дав відповіді на існуючі проблемні питання.

Найбільш важливими серед існуючих обмежень систем РАЗ є недостатня ефективність методів і пристроїв обробки інформаційних сигналів, вітровий знос плями розсіяного радіосигналу внаслідок переміщення акустичного хвильового пакета під дією вітру та порушення умов Брегга зондувальних сигналів по трасі зондування [12 – 14]. Недостатньо вивчені питання аналізу і синтезу зондувальних сигналів систем РАЗ, в той час, як ефективність локаційних систем значною мірою визначається саме потенційними можливостями зондувальних сигналів, що використовуються. Крім того, в системах РАЗ випромінюється пара зондувальних сигналів – акустичний та електромагнітний, які мають різну фізичну природу, що також є значною відмінністю систем РАЗ від інших локаційних систем і потребує додатково вивчення [10 – 12].

У статті розглядаються питання аналізу зондувальних сигналів систем РАЗ в абстрактному функціональному просторі, результати досліджень статті забезпечать можливість постановки і вирішення актуальних задач аналізу і синтезу зондувальних сигналів з використанням математичного апарату функціонального аналізу.

Аналіз публікацій

Найважливіша і невід'ємна частина теорії локаційних систем будь-якого призначення – методи аналізу зондувальних сигналів. Причому слід мати на увазі, що завдання вибору зондувальних сигналів стосовно радіоакустичних систем більш складне і багатопланове, ніж відповідне завдання радіолокаційних систем, має велику кількість ступенів свободи, а, отже, можливості оптимального або навіть задовільного її вирішення шляхом випадкового, інтуїтивного або експериментального пошуку (вибору) дуже невеликі.

Види використовуваних зондувальних сигналів у перших системах РАЗ вибиралися на основі досвіду та знань, отриманих з радіолокації. На підставі результатів експериментів була запропонована досить вдала комбінація зондувальних сигналів, що набула широкого поширення на практиці, – імпульсний акустичний сигнал із синусоїдальним заповненням і безперервний монохроматичний радіосигнал.

Ряд теоретичних робіт [4, 10, 11], присвячених аналізу деяких типів зондувальних сигналів, з'явилися пізніше. Отримані в них результати підтвердили правильність інженерної

інтуїції, що підказала використання зазначеної комбінації сигналів, і дещо розширили уявлення про властивості та можливості інших видів зондувальних коливань.

В [14, 15] розглянуто можливість використання безперервного монохроматичного акустичного випромінювання. Показано, що електромагнітні коливання відбиваються у цьому разі лише від деякого шару, у якому виконується умова Брега. Відбиваючий шар залишається нерухомим з часом, а частота радіосигналу при розсіянні зміщується на частоту звуку і не залежить від швидкості поширення акустичних хвиль у цьому шарі. Доплерівські виміри при цьому неможливі, інформацію про швидкість звуку можна отримати тільки за амплітудними ознаками сигналу, зважаючи на те, що максимум обвідної відповідає висоті, на якій виконується умова Брега. Зрозуміло, що застосування безперервного зондувального акустичного випромінювання з незмінною частотою на практиці недоцільно через низьку оперативність отримання профілів метеовеличин і невисоку точності вимірювань.

Висловлювалася можливість використання акустичного імпульсу змінної частоти з метою забезпечення виконання умови Брега по всій його просторовій протяжності [4]. Це може бути досягнуто за узгодженням закону зміни частоти акустичного імпульсу із законом зміни за висотою швидкості звуку. У реальних умовах профіль швидкості звуку не відомий і його потрібно визначати, а отже використання такого сигналу на практиці важко. Неможливе використання акустичного сигналу як послідовності імпульсів [2] з тієї причини, що спектр відбитого радіосигналу виявляється здвигнутим на значення частоти звуку щодо спектра зондувального сигналу.

Вважається, що отримання інформації з спектра відбитого радіосигналу можливе лише при використанні акустичного зондувального випромінювання у вигляді одиночного імпульсу [10]. При використанні інших видів звукових коливань жодної інформації у частоті відбитого радіосигналу, крім частоти звуку, немає. Інформація про стан атмосфери закодована у цьому випадку в амплітуді радіосигналу, що залежить від ступеня виконання умови Брега.

Певні переваги має акустичний імпульс з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ), що дозволяє підвищити оперативність зондування [4, 10]. Імпульсні звукові сигнали, крім зазначених переваг, забезпечують досить просте виділення просторової області, в якій сформований розсіяний радіосигнал [4, 10].

Завдання вибору виду зондувального радіосигналу для локації обмеженого простору звукового пакету також є непростим. Найбільш прийнятним видом радіосигналу для точного вимірювання доплерівського зсуву є безперервне монохроматичне випромінювання [15, 16], причому його частота повинна вибиратися таким чином, щоб задовольняти умову Брега. Можливе використання також імпульсної послідовності з малою шпаруватістю [2], яка має лінійний спектр.

Найбільшого поширення на практиці отримали акустичні імпульси з немодульованим по частоті заповненням (чи з ЛЧМ заповненням) і безперервне монохроматичне радіовипромінювання (або відповідні імпульси досить великої тривалості) [17].

Значною перешкодою для виконання теоретичних досліджень в області зондувальних сигналів систем РАЗ тривалий час було використання для вирішення цих задач математичного апарату, що базується на рівняннях Максвелла. Існуючі моделі розсіювання хвиль на неоднорідностях атмосфери припускають, як правило, рішення радіофізичного завдання, виходячи з рівнянь Максвелла, внаслідок чого є досить складними та громіздкими [2, 4].

Складність використовуваних моделей ускладнює отримання нових відомостей про об'єкти, що вивчаються, і обмежує коло дослідників, здатних ними скористатися. Крім того, в силу зазначених властивостей вони не можуть виступити як «заступники» розсіювальних об'єктів при вирішенні характерних для теорії систем завдань – аналізу та синтезу зондувальних сигналів, розробки алгоритмів оптимального прийому і т.д.

Останнім часом було запропоновано конструктивну математичну модель інформаційного радіоакустичного локаційного каналу, засновану на системному математичному апараті,

яка отримала назву кореляційної моделі [2, 17]. Це відкриває значні можливості для розвитку досліджень у галузі зондувальних сигналів систем РАЗ.

Розробка математичного апарату аналізу зондувальних сигналів систем РАЗ на основі кореляційної моделі в абстрактному функціональному просторі забезпечить можливість постановки та вирішення актуальних завдань аналізу та синтезу зондувальних сигналів з використанням математичного апарату функціонального аналізу.

Постановка задачі дослідження

У сучасній теорії інформаційних систем і сигналів широке застосування знаходять геометричні уявлення сигналів, що використовують такі поняття як простір, вектор, відстань, і т.п. Широко використовується в практиці аналізу і синтезу сигналів і інших структурних елементів інформаційних систем – антен, фільтрів і т.д. поняття гільбертова простору, яке є лінійним нормованим метричним простором і на якому визначений скалярний добуток.

Яку б природу не мали елементи, що розглядаються, їх вдається уподібнити точкам простору, зберігши аналогію з геометричними образами. При цьому багато залежностей і властивостей об'єктів, що розглядаються, зазвичай отримують наочний геометричний опис, що спрощує вирішення низки завдань. Геометричні аналогії можна і не використовувати при доказі основних результатів, але вони допоможуть намітити шляхи вирішення, усвідомити суттєві особливості завдань, що розглядаються.

Питання підвищення ефективності дослідження, аналізу і синтезу зондувальних систем радіоакустичного зондування атмосфери зараз стоять досить гостро. З одного боку, недостатня вивченість цього питання стримує розвиток систем радіоакустичного зондування, можливість підвищення якісних показників систем. З іншого боку, потенційні можливості зондувальних сигналів значною мірою визначають характеристики локаційних систем, в тому числі і систем РАЗ, а ефективного математичного апарату для вирішення вказаних питань зараз не існує. Особливістю радіоакустичних систем є використання в процесі їх функціонування двох видів зондувальних сигналів – акустичного і електромагнітного, які мають різну фізичну природу. Тому потрібно розробляти нові підходи і новий математичний апарат для використання в задачах аналізу і синтезу зондувальних сигналів систем радіоакустичного зондування атмосфери. Описання процесу взаємодії таких різномірних сигналів в середовищі за допомогою функціонального аналізу і абстрактних математичних просторів, дозволить розглядати такі сигнали сумісно, використовувати наочні геометричні подання і взагалі підвищити ефективність задач дослідження і синтезу таких комплексних, різномірних сигналів.

Подання зондувальних сигналів систем РАЗ у функціональному просторі

При розгляді завдань аналізу та синтезу зондувальних сигналів систем РАЗ атмосфери доцільно використовувати методи та подання функціонального аналізу, що дозволить використовувати наочні геометричні образи та уявлення, при яких сигнали розглядаються як елементи деякого простору, властивості сигналів як властивості простору, а перетворення сигналів, наприклад при розсіянні, як відображення одного простору в інший.

Все різноманіття допустимих акустичних та електромагнітних сигналів представимо у вигляді відповідних множин S_M і E_M (рис. 1, *a*). Завдання синтезу полягає у знаходженні такої пари сигналів, які належать різним множинам, що забезпечує деякі необхідні (оптимальні) властивості критерію синтезу. Вибір критерію доцільно здійснювати з урахуванням вихідних передумов та фізичного змісту задачі, що призвела до постановки проблеми синтезу, на основі неформалізованих процедур [18 – 20]. Структура функціоналу якості повинна визначатися бажаними властивостями синтезованих сигналів, зокрема їх спільними властивостями.

Функціонал якості повинен відображати спільну фізичну здатність акустичного та електромагнітного сигналів до формування розсіяної радіохвилі при їх неузгодженні (розстройці) у просторі та в області хвильових частот, а з іншого боку, відображати їхню близькість у деякому геометричному сенсі при такому неузгодженні. Фізичне суміщення

(а також попередня і подальша неузгодженість) сигналів у просторі завжди виконується в деякому діапазоні дальностей, якщо радіосигнал випромінюється з деякою затримкою у часі після випромінювання акустичного сигналу, а напрямки випромінювання обох хвиль збігаються. Зміна параметра розладу q двох сигналів в області хвильових частот пов'язана зі зміною довжини акустичної хвилі по трасі зондування внаслідок мінливості метеопараметрів (зокрема температури та швидкості вітру).

Ступінь відмінності функцій (сигналів), що належать різним множинам, слід задавати у вигляді деякої відстані, під якою можна розуміти квадратичну різницю сигналів (квадратична метрика), максимальне відхилення функцій у деякому діапазоні значень аргументів (рівномірна або чебишевська метрика) та ін. Квадрат відстані між елементами множини S_M допустимих акустичних сигналів та множини E_M допустимих радіосигналів визначимо як інтеграл квадрата різниці $E(2r' - r)$ та $S(r')e^{-jqr'}$:

$$\Delta^2(r, q) = \int_{-\infty}^{+\infty} |E(2r' - r) - S(r')e^{-jqr'}|^2 dr'. \quad (1)$$

При такому записі кожен елемент множини E_M включає в себе підмножину сигналів, що мають однакову комплексну обвідну E , але відрізняються зсувом по дальності r , відповідно елементи множини S_M відрізняються зсувом по просторовій частоті q .

Розкриваючи підінтегральний вираз, отримаємо

$$\begin{aligned} \Delta^2(r, q) = & \int_{-\infty}^{+\infty} |E(2r' - r)|^2 dr' + \int_{-\infty}^{+\infty} |S(r')e^{-jqr'}|^2 dr' - \\ & - 2 \operatorname{Re} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} E(2r' - r) S^*(r') e^{jqr'} dr' \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Вважаючи, що $\int_{-\infty}^{+\infty} |E(2r' - r)|^2 dr' = \|E\|^2 = 1$, $\int_{-\infty}^{+\infty} |S(r')e^{-jqr'}|^2 dr' = \int_{-\infty}^{+\infty} |S(r')|^2 dr' = \|S\|^2 = 1$ і враховуючи, що третій член (2) містить взаємнокореляційну функцію сигналів $\int_{-\infty}^{+\infty} E(2r' - r) S^*(r') e^{jqr'} dr' = F(r, q)$, запишемо

$$\Delta^2(r, q) = 2[1 - \operatorname{Re}(F(r, q))].$$

Таким чином, двовимірною взаємнокореляційною функцією $F(r, q)$, що характеризує спільну фізичну здатність акустичного та електромагнітного сигналів до формування розсіяної радіохвилі, визначає геометричну міру близькості даних сигналів у функціональному просторі при їх неузгодженні по координаті r та в області хвильових частот q .

Відповідно, завдання синтезу має полягати у знаходженні функцій, які забезпечують необхідний рельєф функціоналу $\Delta^2(r, q)$ чи $F(r, q)$.

Як відомо [21], максимізація вещественної частини скалярного добутку нормованих комплексних функцій еквівалентна мінімізації відстані між цими функціями в комплексному просторі гільбертовому сигналів L^2 . При геометричній інтерпретації кут ϕ між векторами E та S в комплексному гільбертовому просторі визначається співвідношенням

$$\cos \phi = \frac{\operatorname{Re}(E, S)}{\|E\| \|S\|} = \frac{\operatorname{Re} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} E(2r' - r) S^*(r') e^{jqr'} dr' \right]}{\|E\| \|S\|}.$$

Для нормованих сигналів $\cos \phi = \operatorname{Re}(E, S)$.

Оскільки у цій задачі синтезу істотну роль грає форма, структура сигналів, а не їх масштаб, який визначається амплітудою, доцільно використовувати нормовані сигнали, які мають одиничну енергію. Амплітуда сигналу у функціональному просторі визначає лише довжину вектора, отже, нормовані сигнали подаються точками на поверхні одиничної гіперсфери I , а множини E_M та S_M відображаються тоді деякими ділянками гіперсфери.

Таким чином, зменшення відстані між одиничними векторами відповідає зменшенню кута між ними та збільшенню $\cos \phi$. Якщо функції E і S збігаються, то $(E, S) = 1$, $\cos \phi = 1$ ($\phi = 0$). При $(E, S) = 0$ і $\cos \phi = 0$ ($\phi = \pi/2$) сигнали стають ортогональними (рис. 1, б).

Кут ϕ між акустичним та електромагнітним сигналами є функцією параметрів r , q , що характеризують неузгодженість функцій. При $r = 0$, $q = 0$, якщо функції $E(2r')$ і $S(r')$ еквівалентні, вони відображаються однією точкою гіперсфери, оскільки, як відомо [21], і в комплексному і в дійсному гільбертових просторах L^2 еквівалентні між собою функції є одним і тим же елементом простору. Отже, кут між такими сигналами $\phi = 0$.

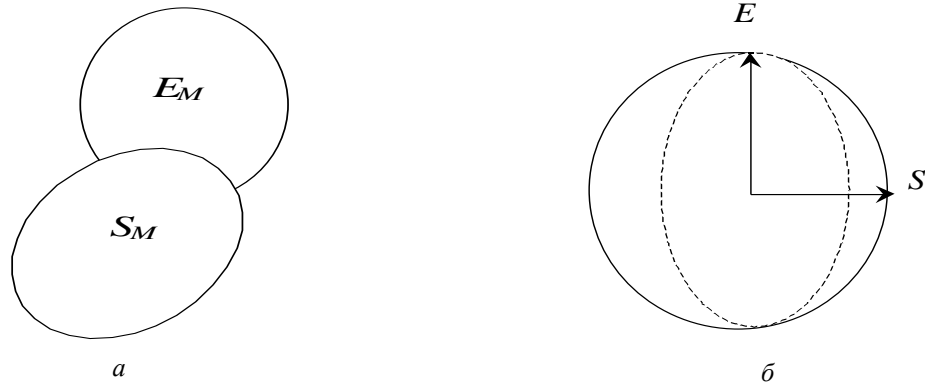


Рис. 1 Геометричні образи електромагнітного та акустичних сигналів, а також множин E_M і S_M , які є перетинальними

Зі зміною r та q функції $E(2r' - r)$, $S(r')e^{-jqr'}$, змінюючи своє геометричне положення, віддаляються один від одного і при деяких значеннях параметрів r , q , кут між цими векторами сигнальними стає рівним $\phi = \pi/2$, тобто сигнали стають ортогональними. Розсіяний радіосигнал за такого стану функцій на гіперсфері дорівнює нулю.

Величину $\cos \phi$ (або взаємкореляційну функцію), що характеризують відстань у функціональному просторі з квадратичною метрикою між нормованими сигналами і кут між їх геометричними образами, називають [22, 23] коефіцієнтом близькості сигналів E і S : $B(E, S)$. Коефіцієнт близькості множин E_M і S_M , що відповідає мінімальній відстані між цими множинами, визначається як

$$B(E_M, S_M) = \max_{S \in S_M, E \in E_M} \text{Re}(S, E)$$

Дослідження взаємного положення векторів зондувальних сигналів у функціональному просторі

Аналіз відстаней між зондувальними сигналами – радіо- та акустичним імпульсами з прямокутними обвідними. У роботі досліджується зміна відстаней між зондувальними сигналами систем радіоакустичного зондування атмосфери у функціональному просторі. Аргументами функції відстані в цьому просторі є поздовжня просторова координата, вздовж якої переміщуються сигнали в процесі зондування атмосфери, будучи випромінюваними з поверхні землі, а також параметр розладу умови Бреґу q .

На рис. 2 представлена поверхня відстаней у функціональному просторі між векторами простих зондувальних сигналів – радіоімпульсу та акустичного імпульсу з прямокутними обвідними. В області малих значень параметрів r , q поверхня відстаней спрямовується в область малих значень, форма поверхні в цій області визначається основною пелюсткою поверхні довгастої форми і в деякому діапазоні значень аргументів поблизу точки $r = 0$, $q = 0$ значення функції будуть близькі до нуля, тобто. вектори акустичного та електромагнітного сигналів у цій галузі досить близькі один до одного і відстань між ними у функціональному просторі невелика.

Як видно, поверхня відстаней аналізованих сигналів на деякому віддаленні від головної пелюстки має бічні пелюстки. Це є наслідком того, що прямокутні форми обвідних аналізованих зондувальних сигналів містять круті фронти, по суті розривні функції, мають досить широкий спектр, що простягається досить далеко по осі просторових частот у вигляді бічних пелюсток.

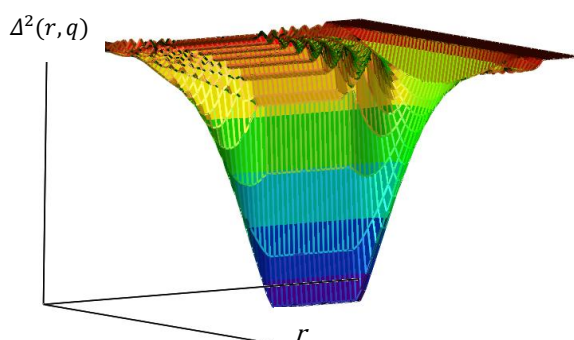


Рис. 2. Поверхня відстаней простих зондувальних сигналів – радіо- і акустичного імпульсів з прямокутними обвідними

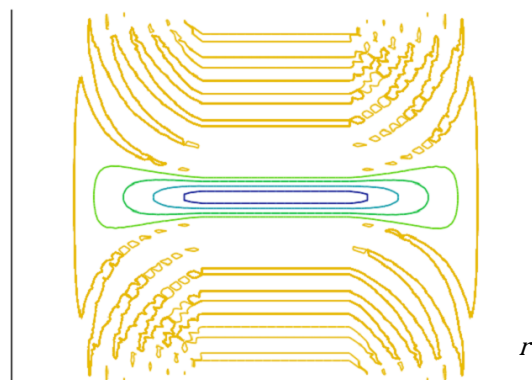


Рис. 3. Поверхня відстаней для простих зондувальних сигналів – радіо- та акустичного імпульсів з прямокутними обвідними у вигляді ліній однакових контурів

Поверхня відстаней у вигляді ліній однакових контурів для простих зондувальних сигналів – акустичного та радіоімпульсів з прямокутними обвідними представлена на рис. 3. Дана форма подання поверхні відстаней дозволяє більш наочно уявити бічні пелюстки аналізованої поверхні, що знаходяться у верхній частині поверхні, де ступінь зв'язку аналізованих зондувальних сигналів відносно невелика.

Перетин поверхні відстаней сигналів, зображеної на рис. 2 вертикальними площинами при фіксованих значеннях параметра q вздовж осі r , представлені на рис. 4. Перетин, отриманий при значенні параметра розладу $q_1 = 0$, визначає форму головної пелюстки поверхні, перерізи, отримані при значеннях параметра $q_2 > q_1$, $q_3 > q_2$ також характеризують форму головної пелюстки, але їх рівень свідчить про менше зближення зондувальних сигналів в даній області функціонального простору. Перетин, отриманий при значенні параметра $q_4 > q_3$, припадає на область бічних пелюсток поверхні, що свідчить про ще менше зближення зондувальних сигналів в даній області. Рівень бічних пелюсток поверхні є досить значним, що обумовлено присутністю в комбінації зондувальних сигналів двох коливань з прямокутними обвідними, що володіють крутими переднім і заднім фронтами.

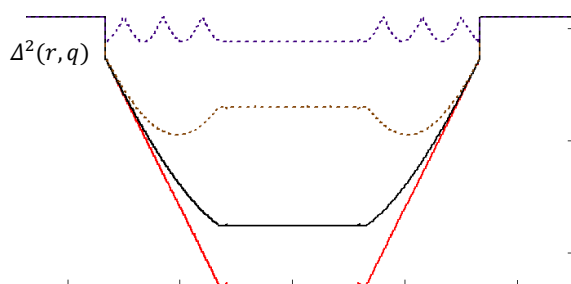


Рис. 4. Перетин поверхні відстаней сигналів, зображеної на рис. 2, вертикальними площинами вздовж осі r при фіксованих значеннях параметра q

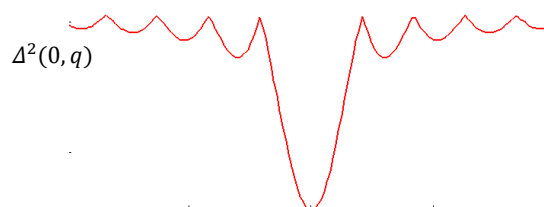


Рис. 5. Перетин поверхні відстаней сигналів, що зображена на рис. 2, вертикальною площиною вздовж осі q при значенні параметра $r=0$

Перетин поверхні відстаней сигналів, що зображено на рис. 5, вертикальною площиною, що проходить вздовж осі q , при значенні параметра $r=0$ характеризує зближення сигналів у функціональному просторі зі зміною значення параметра розладу умови Брегга, викликаною зміною довжини хвилі акустичного сигналу під впливом зміни метеорологічних параметрів атмосфери. Крива має монотонний характер в області головної пелюстки – у міру зменшення значень параметра q відбувається зближення, зменшення відстані між зондувальними сигналами, при $q=0$ досягається мінімум відстані, і далі в міру збільшення значення параметра q , тобто різниці між значеннями просторових частот зондувальних сигналів відбувається монотонне збільшення відстані між сигналами. У міру подальшого збільшення

значення параметра розладу q спостерігаються бічні пелюстки в залежності, рівень яких досить значний, він становить близько 0,1 від рівня головної пелюстки.

Аналіз поверхні відстаней між зондувальними сигналами – радіоімпульсом з прямокутною обвідною та акустичним імпульсом з гаусовою обвідною. На рис. 6 представлена поверхня відстаней між векторами простих зондувальних сигналів – радіоімпульсу з прямокутною обвідною і акустичного імпульсу з гаусовою обвідною. В області малих значень параметрів r , q поверхня відстаней спрямовується в область малих значень, форма поверхні в цій області визначається основною пелюсткою поверхні і в деякій області поблизу точки $r = 0$, $q = 0$ значення функції будуть близькі до нуля, тобто вектори акустичного та електромагнітного сигналів у цій області досить близькі один до одного.

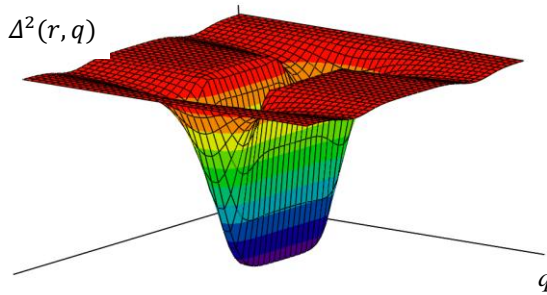


Рис. 6. 3D уявлення поверхні відстаней простих зондувальних сигналів – радіоімпульсу з прямокутною обвідною та акустичного імпульсу з гаусовою обвідною

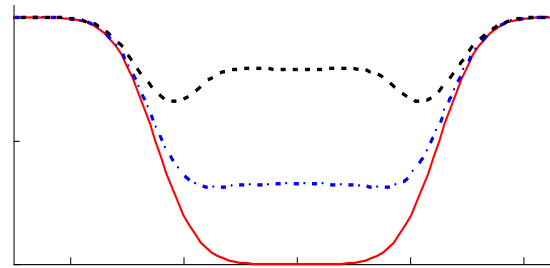


Рис. 7. Перетин поверхні відстаней сигналів, зображеної на рис. 6, вертикальними площинами вздовж осі q при фіксованих значеннях параметра r

Перетин поверхні відстаней сигналів, зображеної на рис. 6 вертикальними площинами вздовж осі r при фіксованих значеннях параметра q , представлено на рис. 7. Перетин, отриманий при значенні параметра розладу $q_1 = 0$, визначає форму головної пелюстки поверхні, переріз, отриманий при значенні параметра $q_2 > q_1$ відображає менший рівень максимального зближення сигналів у цій області. Перетин, отриманий при значенні параметра $q_3 > q_2$ забезпечує ще менший рівень максимального зближення сигналів, переріз має також невеликі бічні пелюстки, обумовлені присутністю в комбінації зондувальних сигналів одного сигналу з прямокутною обвідною, що має круті передній і задній фронти.

Перетин поверхні відстаней сигналів, що зображена на рис. 6, вертикальною площиною вздовж осі q при значенні параметра $r=0$ має вигляд гладкої кривої (рис. 8). Найменше значення функції, що відповідає максимальному зближенню зондувальних сигналів, забезпечується при $r = 0$, $q = 0$. У міру збільшення параметра розладу q значення функції збільшується, що свідчить про розходження векторів зондуючих сигналів у просторі відстаней.

Перетин поверхні відстаней сигналів, що зображена на рис. 7, вертикальною площиною вздовж осі q при значенні параметра $r=0$ характеризує зближення сигналів у функціональному просторі зі зміною значення параметра розладу умови Брега при зміні довжини хвилі акустичного сигналу під впливом зміни метеорологічних параметрів атмосфери. Крива має монотонний характер – зі зменшенням значень параметра q відбувається зближення, зменшення відстані між векторами зондувальних сигналів, при $q = 0$ досягається мінімум відстані, і далі зі збільшенням параметра q , тобто різниці між значеннями просторових частот зондувальних сигналів, відбувається монотонне збільшення відстані між сигналами.

Аналіз поверхні відстаней між векторами зондувальних сигналів – радіо- та акустичного імпульсів з гаусовими обвідними. 3D подання поверхні відстаней сигналів, зображеної на рис. 9, характеризує зближення зондувальних сигналів з гаусовими формами обвідної у функціональному просторі зі зміною значення параметра розладу умови Брега і при зміні неузгодженості сигналів по поздовжній просторовій координаті.

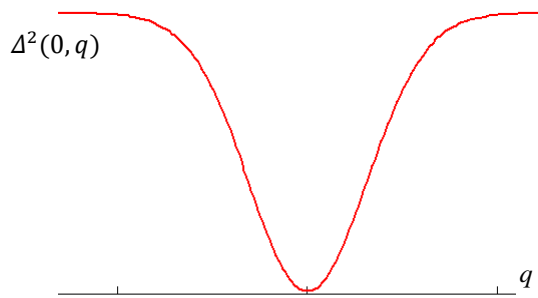


Рис. 8. Перетин поверхні відстаней сигналів, що зображена на рис. 6, вертикальною площиною вздовж осі q при значенні параметра $r=0$

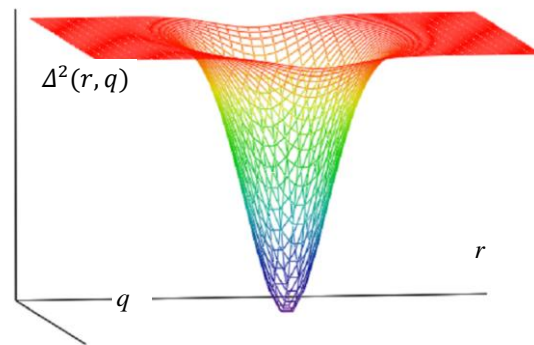


Рис. 9. 3D подання поверхні відстаней для простих зондувальних сигналів – радіо- та акустичного імпульсів з гаусовими формами обвідних

Крива має монотонний характер – в міру зменшення значень параметрів r і q спостерігається зближення, зменшення відстані між зондувальними сигналами, при $r = 0$, $q = 0$ досягається мінімум відстані, і далі в міру збільшення значень параметрів r і q має місце монотонне збільшення відстані між сигналами. Обидва аналізовані зондувальні сигнали мають обвідні гладкої форми, тому характер зміни відстаней між сигналами у функціональному просторі також описується гладкою монотонною залежністю, що не має бічних пелюсток.

Висновки

1. Розроблено математичну модель, що визначає відстань між векторами акустичного та електромагнітного зондувальних сигналів систем радіоакустичного зондування атмосфери у функціональному абстрактному математичному просторі. Аргументами функції відстані в цьому просторі є поздовжня просторова координата, уздовж якої переміщуються сигнали в процесі зондування атмосфери, будучи випроміненими з поверхні землі, а також параметр розстроювання умови Брега q . Параметр Брега q змінюється внаслідок зміни довжини хвилі акустичних коливань під впливом зміни метеорологічних параметрів атмосфери – температури середовища, вологості повітря.

Розглянуті аргументи r і q , з одного боку, є фізичними параметрами, що характеризують стан простору, в якому відбувається взаємодія акустичної та електромагнітної хвиль, які мають різну фізичну природу, а з іншого боку, їх слід розглядати як параметри абстрактного функціонального математичного простору, що дасть змогу вивчити характерні особливості зміни відстані між функціями, що розглядаються, у математичному просторі.

2. Методом математичного моделювання вивчено особливості поверхонь відстаней для різних пар зондувальних сигналів у вигляді простих без внутрішньоімпульсної модуляції імпульсів із прямокутними та гасовими формами обвідних. Загальні закономірності вивчених поверхонь відстаней сигналів такі: є деяка головна пелюстка поверхні, у якій зв'язок зондувальних акустичного й електромагнітного сигналів, що мають різну фізичну природу, значний. У міру зростання значень параметрів функціонального простору, ступінь зв'язку сигналів зменшується і залежно від форм обвідних сигналів, можуть спостерігатися бічні пелюстки поверхні, розміри яких залежать від характерних особливостей обвідних.

3. Вивчені особливості поверхонь відстаней для різних видів і форм зондувальних сигналів будуть затребувані в задачах дослідження й аналізу властивостей різних зондувальних сигналів, у задачах синтезу оптимальних форм зондувальних сигналів, адаптації форм сигналів до мінливих зовнішніх характеристик середовища. Усі ці сигнальні задачі будуть розв'язуватися в абстрактному функціональному математичному просторі з використанням певних критеріїв оптимальності та математичних методів, що використовуються у функціональному аналізі.

Список літератури:

1. Bradley S. Atmosphere Acoustic Remote Sensing. Principles and Application. CRC Press, 2007. 267 p.
2. Kartashov V.M., Tikhonov V.A., Oleinikov V.N. Signal processing in radio electronic systems for remote monitoring of the atmosphere. Kharkiv : KNURE, 2014. 312 p.
3. Карташов В.М. Моделі і методи обробки сигналів систем радіоакустичного і акустичного зондування атмосфери. Харків : ХНУРЕ, 2011. 234 с.
4. Lataitis R.J. Theory and Application of a radio-acoustic sounding system (RASS): NOAA Technical Memorandum ERL WPL-230. Nat. Oceanic and Atmos. Admin. Environ. Res. Labs. Boulder, CO, 1993, 207 p.
5. Kartashov V., Babkin S., Kartashov A., Pershyn Y. Development of the Atmosphere Radio-Acoustic Sounding Method in Ukraine and in the World in the Period of 1961-2000 // 2023 IEEE 6th International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, UkrMiCo 2023, 13–15 November 2023, Kyiv, Ukraine. P. 372–376. DOI: 10.1109/UkrMiCo61577.2023.10380339
6. Remtech Radio Acoustic Sounding System (RASS) for remote sensing of temperature. URL: <https://remtechinc.com/wp-content/uploads/RASS3.pdf>.
7. Temperature Profiler RASS. URL: <https://metek.de/product-group/rass/>.
8. RASS for Radar Wind Profilers. URL: <https://www.scintec.com/catalogs/rass-for-radar-wind-profilers/>.
9. Ситнік О.В., Карташов В.М. Радіотехнічні системи : навч. посіб. Харків : Сміт, 2009. 448 с.
10. Chandrasekhar Sarma, T. V., Narayana Rao, D., Furumoto, J., and Tsuda, T. Development of radio acoustic sounding system (RASS) with Gadanki MST radar – first results // Ann. Geophys. 2008. №26. P. 2531–2542. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-2531-2008>
11. Alexander S. P., Murphy D. J., Klekociuk A. R., High resolution VHF radar measurements of tropopause structure and variability at Davis, Antarctica (69° S, 78° E) // Atmos. Chem. Phys. 2013. №13. P. 3121–3132. doi:10.5194/acp-13-3121-2013
12. Kartashov V.M. Estimation of Signal Parameters Scattered by an Acoustic Wave Packet // Telecommunications and Radio Engineering, 2004. Vol. 61, №2. P. 125–129.
13. Muradyan P., Richard Coulter R. Radar Wind Profiler (RWP) and Radio Acoustic Sounding System (RASS) Instrument Handbook. March, 2020. Environmental Science Division, Argonne National Laboratory. 20 p. URL: https://www.arm.gov/publications/tech_reports/handbooks/rwp_handbook.pdf
14. Kartashov V.M. Signal Scattering Functions of Atmospheric Sounding System // Telecommunications and Radio Engineering. 2003. Vol. 59, №7–9. P. 88–94.
15. Kartashov V., Oleinikov V., Koryttsev I., Sheiko S., Zubkov O., Babkin S. Processing of Wide Band Acoustic Signals During Detection of Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, September 21 – 25, 2020. Vol. 1 on 2020 IEEE 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). P. 35–39.
16. Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision / O. Sergiyenko, J.C. Rodriguez-Quiñonez. IGI Global, 2016. 341p.
17. Kartashov V.M., Tikhonov V.A., Voronin V.V. and Tymoshenko L.P. Complex model of random signal in problems of acoustic sounding of atmosphere // Telecommunications and Radio Engineering, 2016. V. 75, Iss. 20. P.1885–1892.
18. Oleksandr Sotnikov, Vladimir Kartashov, Oleksandr Tymochko, Oleg Sergiyenko, Vera Tyrsa, Paolo Mercorelli, Wendy Flores-Fuentes. Methods for Ensuring the Accuracy of Radiometric and Optoelectronic Navigation Systems of Flying Robots in a Developed Infrastructure. Chapter 16 // Machine Vision and Navigation. Springer, Cham. P.537–578.
19. Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision / O. Sergiyenko, J.C. Rodriguez-Quiñonez. IGI Global, 2016. 341p.
20. Піза Д.М. Теорія і проектування радіолокаційних систем : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. 82 с.
21. Сумик М. М. Основи теорії радіотехнічних систем : навч. посіб. Львів : Львівська політехніка, 2004. 240 с.
22. Радіоелектронні системи : навч. посіб. / Ю.М. Седишев та ін. Харків : ХУПС, 2010. 360 с.
23. Радіоелектронні системи : навч. посіб. / П. Ю. Баранов, В. П. Лавриненко, О. М. Мелешкевич, В. С. Дмитренко. Одеса, 2012. 232 с.

Надійшла до редколегії 15.10.2024

Відомості про авторів:

Шамрай Антон Павлович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Україна; email: anton.shamrai@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4714-4983>

Кондрашов Ігор Євгенович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Україна; email: igor.kondrashov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4618-1415>

В.М. КАНЦЕДАЛ, канд. техн. наук

ПОЛІПШЕННЯ РІВНЯ ФОРМАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ НА ОСНОВНИХ ЕТАПАХ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ПРОТИДІЇ МАЛИЙ БЕЗПЛОТНИЙ АВІАЦІЙНИЙ СИСТЕМИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ КОНФЛІКТНИХ ПЕРЕВАГ

Вступ

На даний час актуально вирішення проблеми підвищення на тактичному рівні ефективності радіоелектронної протидії наземних комплексів РЕП загрозам, що несуть малі беспілотні авіаційні системи (БАС) з використанням їх специфіки та тактики застосування [1 – 10]. В тексті розглядаються малі БАС, що наводять розвідувально-ударні БПЛА типу Суперкам чи Ланцет [3, 4] при їх проникненні у тил на відстань від 10 до 100 км для ураження важливих об'єктів. Ефективність їх застосування при об'єктовій обороні залежить від можливостей радіоелектронної протидії комплексу РЕП. Значні загрози застосування малих безпілотників викликають необхідність удосконалення засобів радіоелектронної протидії та їх застосування з підвищенням вимог до їх тактико-технічних характеристик (ТТХ).

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Велика кількість праць, зокрема [1 – 7], присвячена опису різноманітних факторів, що впливають на ефективність функціонування БПЛА. У ряді робіт розглядаються засоби протидії БПЛА у вигляді структур типових спеціалізованих комплексів протидії БПЛА, огляд яких виконано в [1, 5, 8, 9]. Для цих структур переважним є виявлення сигналів радіочастотного каналу передачі даних між оператором та БПЛА, а радіоелектронна протидія здійснюється глушінням або заміною інформаційних повідомлень каналу передачі даних та радіоліній навігації в умовах маніпулювання БПЛА стандартними каналами передачі даних. Типові комплекси РЕП мають обмежені можливості проти загроз сучасних типів малих БПЛА. Вони працюють до того часу, поки безпілотник залежить від каналу передачі, а пасивні засоби розвідки комплексу розпізнають їх сигнали. Коли безпілотник працює автономно і в режимі радіомовчання, не вимагаючи каналу передачі даних, ці комплекси не будуть ефективними.

Тому розглядається більш досконала структура комплексу РЕП, що відповідає загальним тенденціям розвитку радіоелектронної протидії [1, 5, 6, 8, 10] і реалізує методи виявлення та нейтралізації загроз малих безпілотників. Вона заснована на об'єднанні маловисотного радіолокатора з пасивними радіочастотними розвідувальними засобами для більш достовірного виявлення малого БПЛА, точного визначення його сигнатур та з засобами його сигнального фізичного або прихованого інформаційного придушення, що мають підвищені ТТХ на основних етапах функціонування комплексу РЕП. До складу цих етапів входять три послідовних етапи: етап пошуку, виявлення і визначення сигнатур малого БПЛА та формування даних, необхідних для управління засобами розвідки та придушення; етапи фізичного сигнального та прихованого інформаційного придушення БПЛА. Вони характеризуються ситуаційним управлінням різними видами засобів розвідки, генерації та постановки різних видів загороджувальних за частотою та часом, імітаційних активних завад, сигналоподібних та інформайтно-технологічних впливів, їх можливих комбінацій із виваженням та спільним використанням сукупних вразливостей окремих ліній зв'язку його командної радіолінії управління (КРУ) та навігації місцевої ССРН. Це супроводжується перенесенням зусиль з глушіння на більш ефективні та конфліктно стійкі в умовах протидії БПЛА та зовнішніх заводових чинників [1, 10] – цілеспрямоване перехоплення сигналів та підміни (спуфінгу) їх інформаційних повідомлень, що не завжди відбувається у традиційних комплексах РЕП. Таким чином, доводиться мати справу з певними сигнатурами малих БПЛА як об'єктів засобів радіолокаційної, радіотехнічної та радіоелектронної розвідки. Сигнатури мають вигляд

відповідно до потреб сукупності задач придушення БПЛА, що послідовно вирішуються: дані локації виявленого малого БПЛА – його просторово-часового розташування в зоні відповідальності комплексу РЕП та траєкторних ознак розпізнавання, структурно-частотного портрету загальної електромагнітної обстановки (ЕМО) та структурно-інформаційного портрету сукупності інформаційних повідомлень і протоколів інформаційного обміну (СППІО) БПЛА різного ступеня невизначеності, створених сукупністю його ліній радіозв'язку та радіонавігації.

В комплексі РЕП приймається на етапах його функціонування велика кількість різноманітних рішень стосовно між етапного та внутрішньо етапного ситуаційного управління. Вони різняться за змістом, термінами дії та розробленням, спрямованістю впливу, інформаційною забезпеченістю, використанням ресурсів, рівнем прийняття рішень тощо. У зв'язку з цим виникає потреба в упорядкуванні рішень та підвищенні керованості комплексу РЕП.

Одним із можливих напрямів, що сприяє ефективному вирішенню проблем радіоелектронного придушення БАС, є використання комплексного підходу, пов'язаного з підвищенням керованості засобів комплексу РЕП внаслідок поліпшення рівня системної формалізації опису стану конфліктної ситуації та процесів ситуаційного управління на основних етапах його функціонування як засобів її вирішення. Для цього розглядається спрощена 2-стороння динамічна модель конфліктної взаємодії малої БАС і одноцільового комплексу РЕП. Її основою є інформаційний опис стану конфліктної ситуації (КС), що базується на взаємодії складових частин структур багатофункціональних зразків технічної побудови малої БАС і комплексу РЕП узгоджено до уразливості малої БПЛА. Опис стану КС надається через зміну протистояння критично важливих для БАС і комплексу РЕП їх приватних ТТХ на етапах його функціонування з урахуванням впливу особливостей побудови малої БАС і комплексу РЕП та тактик їх застосування [10]. Конфліктна взаємодія малої БАС і комплексу РЕП характеризується керованими процесами взаємодії їх складових частин, які можна перевести в потрібний стан шляхом докладання цілеспрямованого впливу, що керує, на ці компоненти за кінцевий інтервал часу. Зі сторони комплексу РЕП [10] конфлікт керується в мінливій обстановці загроз БПЛА алгоритмами радіоелектронної протидії контурів циклів міжетапного та внутрішньоетапного ситуаційного управління, що включають відповідні інформаційні, управляючі та виконавчі засоби.

Інформаційний опис вхідних складових поточного стану КС у вигляді наведених сигналів БПЛА залежить від ступенів їх невизначеності, потреб етапів функціонування комплексу РЕП, а також від складу певних ключових приватних ТТХ БПЛА і комплексу РЕП та їх співвідношення на окремих етапах. Оскільки з часом склад і зміст стану КС змінюється під дією управління, уточнюється знання про загрозу БПЛА та результати радіоелектронної протидії в обмеженнях 2-сторонньої моделі динамічного конфлікту, що розглядається, то це робить необхідним в ході конфлікту синтезувати і коригувати закони циклів управління процесами вирішення функціональних завдань на етапах функціонування комплексу РЕП та координації його дій. Їх метою є адаптація контурів управління до поточної загрози БПЛА та забезпечення найкращих можливостей її нейтралізації, в тому числі нав'язування БПЛА хибних режимів польоту за допомогою інформаційно-технологічних впливів в рамках внутрішньо етапного та між етапного ситуаційного управління.

Аналіз відомих публікацій показав відсутність публікацій, присвячених побудові циклів міжетапного та внутрішньоетапного ситуаційного управління процесами радіоелектронної протидії малій БАС з комплексним використанням приватних ТТХ та значень їх показників як системного інструменту формалізації процесів спостереження та прийняття рішень.

Метою статті є досягнення конфліктних переваг комплексу РЕП за рахунок поліпшення рівня формалізації процесів забезпечення результативності на етапах внутрішньоетапного ситуаційного управління. При цьому беруться до уваги загрози та специфіка побудови і застосування технічних зразків багатофункціональної малої БПЛА та комплексу РЕП, обґрунтований вибір складу та оптимізація порядку застосування ефективних технічних виконав-

чих засобів розвідки та придушення у контурах циклів управління ними з використанням критично важливого для БАС та комплексу РЕП переліку приватних ТТХ та їх показників.

Виклад основного матеріалу

Цикл між етапного та цикли внутрішньо етапного когнітивного ситуаційного управління комплексом РЕП є начальними особливостями формалізації процесів управління в системі автоматизованого управління (САУ) комплексом РЕП. Вони полягають у необхідності дотримуватися певного рівня формалізації постановок завдань управління та пошуку їх вирішення на основних етапах функціонування комплексу РЕП. Це дозволяє одночасно розглянути аналіз (оцінку) умов застосування виконавчих засобів контурів управління САУ, їх призначення та порядок застосування та, як наслідок, реалізацію синтезованих законів управління за допомоги швидкої та гнучкої перебудови (реконструкції) структури комплексу РЕП для досягнення поставленої мети управління на окремих етапах його функціонування та в цілому. При цьому важливим фактором є час, який звітує від моменту раннього виявлення та аналізу загроз БПЛА і необхідний для своєчасного вибору способів протидії та їх застосування, щоб не дати БПЛА якомога ближче наблизитися до об'єкту враження та завдати максимально точного удару. Це є загальним завданням циклу міжетапного когнітивного ситуаційного управління. Він спрямований на максимальну сумісну результативність етапів функціонування, налаштування синергії вжитих зусиль на цих етапах. Даний цикл характеризується особливостями їх послідовної зміни, пов'язаних з використанням певних вразливостей БАС, комплексуванням контурів циклів управління етапними виконавчими засобами на основі узгодження їх ТТХ в умовах різного ступеню невизначеності стану КС, високої динамічності виконуваних функціональних завдань та можливій протидії малого БПЛА. Результативність цього циклу полягає в тому, щоб зробити малий БПЛА не тільки некерованим (порушити роботу його КРУ), але і доступним для перехоплення його управління та отримання контролю над траєкторією його польоту (наприклад, для подачі команди на посадку або зміни курсу його польоту, або для відведення його від об'єкту враження при використанні ним наведення на джерела випромінювання) при фізичному сигнальному або прихованому інформаційному видах радіоелектронного придушення.

У зв'язку з цим потрібно здійснювати постійний контроль витрачання часу на реалізацію цілей функціональних завдань на етапах функціонування комплексу РЕП. Контроль часу також необхідний при оцінці інтервалу стабільності конфліктної ситуації, інтервалу часу існування корисної інформації з інформаційних повідомлень БПЛА і таке інше.

Направленість циклів внутрішньо етапного когнітивного ситуаційного управління полягає в виявленні, аналізі та використанні різних сторін вразливості БАС. При чому БАС характеризується малим розміром БПЛА, конструкція якого виконана за технологією Stealth, малою висотою польоту, малою швидкістю, маневреністю та віддаленістю від наземного пункту управління (НПУ). Сигнатури ЕМО та СШППШО залежать від:

- наявності суттєвих відмінностей ТТХ ліній радіозв'язку напрямків НПУ-БПЛА, БПЛА-НПУ та навігації БПЛА [5], які враховують передачу інформаційних даних принципово різного типу, рівня важливості та обсягу. Лінії радіозв'язку БПЛА можуть організовуватися в різних частотних діапазонах, використовувати різні сигнально-кодові конструкції, спеціально адаптовані під тип і важливість інформаційних повідомлень, що передаються;

- впливу змін параметрів роботи КРУ БПЛА, викликаних змінами: взаємного розташування БПЛА та НПУ, параметрів середовища розповсюдження сигналу (вид модуляції, кодування, швидкість передачі даних та ін.) залежно від умов проходження сигналу, що дозволяє більш ефективно використовувати енергетичний ресурс каналів зв'язку та багаторазово підвищувати ефективність роботи КРУ БПЛА;

- впливу змін взаємного розташування БПЛА та засобі розвідки і придушення, а також змін ТТХ останніх внаслідок керування ними, коли комплекс РЕП знаходить та досліджує на своїх етапах функціонування різні сторони уразливості БАС, долає такі її ТТХ як розвідува-

льна, завадо- та імітозахищеності, що має відношення до малопомітності БПЛА, сигналів його КРУ, радіонавігації та переданих інформаційних повідомлень.

Цей вид управління БПЛА є основою для побудови між етапного ситуаційного управління.

Наступні особливості формалізації полягають у виділенні та аналізі впливів загальних та відмінних властивостей процесів внутрішньо етапного управління.

Так, до загальних чинників, що суттєво впливають на його ефективність, відносяться:

- склад і багатофункціональна побудова комплексу РЕП, що реалізує базові принципи вирішення проблемних завдань, які розглядаються на основних його етапах роботи узгоджено до уразливості технічних зразків малого БПЛА та БАС в цілому;

- подання конфліктних ситуацій БПЛА (БАС) та комплексу РЕП як протидії їх приватних ТТХ на етапах його функціонування з урахуванням впливу особливостей малої БАС і комплексу РЕП та тактик їх застосування;

- застосування системно-процесного, когнітивного підходу до управління та рефлексивної форми управління, що спирається на знання про 2-сторонню динамічну модель конфліктної взаємодії БАС та комплексу РЕП, високий рівень професійних компетенцій суб'єктів (операторів) управління, а також наявність у структурі інформаційних та керуючих засобів контурів управління, засобів штучного інтелекту та автоматизації;

- використання методичних переваг формалізованих постановок завдань ситуаційного управління та пошуку їх рішень на основі використання переліку критично важливих для БАС і комплексу РЕП приватних ТТХ в умовах невизначеності стану конфліктних ситуацій та обмежень на витрати ресурсу, що пов'язані із застосуванням певного ряду цілей, критеріїв та вибору способів вирішення завдань в інформаційних, керуючих та виконавчих засобах контурів циклів управління на окремих етапах функціонування комплексу РЕП.

Так, на всіх етапах функціонування комплексу РЕП прийнята стандартна постановка завдання когнітивного управління реалізацією конфліктних переваг та порядок пошуку рішень, що орієнтовані на отримання якісного інформаційного опису загального поточного стану КС, результативностей певного складу задіяних засобів розвідки чи придушення, виконанні дій щодо зближення показників їх фактичних станів з очікуваними відповідно до мети, критерію управління та задоволення вимог щодо дефіциту часу на прийняття управлінських рішень, раціонального використання ресурсів, скорочення їх витрат та врахування впливу суб'єктності кризового управління. Постановка завдання управління та пошук рішень здійснюється за виразом [10 – 12]:

$$Q_{jik} | S^M - S^\Phi |_{jik} \rightarrow \text{extr}, R_j \rightarrow \min, T_j \leq T_{j\text{-доп}}, \quad (1)$$

де Q_{jik} – складний критерій якості управління з урахуванням характеристик та особливостей кожного етапу (наприклад, результативності як зіставлення очікуваних значень ТТХ та фактично отриманих; j – номер етапу функціонування комплексу РЕП; i – складова опису стану КС або засобів розвідки чи придушення; k – номер циклу управління i -ю складовою стану КС, або засобів розвідки чи придушення на j -му етапі; $|S^M - S^\Phi|$ – різниця між очікуваними показниками і фактичними показниками якості інформаційного опису складових стану КС, або результативності задіяних засобів розвідки чи придушення на етапі, досягнутого на даний момент часу внаслідок реалізації синтезованого закону управління перебудовою структури комплексу РЕП, а також контролю умов спостереження та результату управління із зазначенням кількісних характеристик ступеня досягнення мети управління; R_j – вектор, що характеризує види витрат ресурсів, що є у розпорядженні комплексу РЕП на даний момент часу; $T_{j\text{-доп}}$ – допустимий час синтезу та реалізації закону управління та координації дій.

Рішення завдань управління на кожному етапі виробляються з застосування принципу спільної реалізації функцій: пізнання стану КС, керування необхідними для досягнення мети засобами, керування використанням проблемно-орієнтованих знань, ресурсів у циклі ситуаційного управління. Керування стосується:

– засобів радіолокаційної, радіотехнічної та радіоелектронної розвідки для виявлення БПЛА, отримання ситуаційної обізнаності, аналізу та прогнозу характеру змін результатів розвідки сигнатур БПЛА, оцінки ступеню його загрози, формування в реальному часі даних необхідних для цілепокладання та синтезу закону управління засобами розвідки та радіоелектронної протидії БПЛА;

– комплексного призначення режимів роботи виконавчих технічних засобів контурів управління;

– реалізації синтезованих законів управління швидкою та гнучкою перебудовою структури комплексу РЕП, активації призначених засобів та контролю кількісних характеристик ступеня досягнення мети управління відповідно до прийнятих управлінських рішень.

При цьому до інформаційних та керуючих засобів контурів ситуаційного управління пред'являються типові вимоги [1, 6, 11], водночас вимоги до виконавчих засобів суттєво відрізняються.

Шукані матричні рішення є результатом застосування, залежно від невизначеності умов спостереження та прийняття рішень:

для формалізованих завдань управління з застосуванням засобів автоматизації та штучного інтелекту: логіко-оптимальні; логіко-лінгвістичні, експертні, машинно-навчених нейро-нечіткі мережі;

для важко формалізованих завдань управління: інтерпретаційно-дослідні з урахуванням суб'єктності управління.

Відмінні характеристики процесів циклів внутрішньо етапного управління досліджуються нижче при розгляді окремих етапів управління.

1. Цикли ситуаційного управління пошуком та виявленням БПЛА, вимірюванням параметрів його сигнатур та формуванням даних, необхідних для керування засобами різних видів розвідки та радіоелектронної протидії

Розгляд на даному етапі особливостей підвищення рівня системної формалізації процесів управління пошуком, виявленням малого БПЛА та розвідки його характеристик, необхідних для організації радіоелектронної протидії, починається з інформаційного опису складових КС. Конфліктна ситуація при цьому відображає стан пізнання комплексом РЕП ситуаційної обізнаності в зоні відповідальності комплексу РЕП відносно стану 2-сторонньої динамічної моделі конфліктної взаємодії складових частин багатофункціональних структурних схем комплексу РЕП і малої БАС в залежності від розвідувальної захищеності БПЛА. Ситуаційна обізнаність дозволяє комплексу РЕП ефективно сприймати, аналізувати та реагувати на ситуації, що виникають під час виконання завдань протидії польоту БПЛА. Вона охоплює розуміння загроз стану навколишнього середовища, в якому БПЛА здійснює політ, виявлення протидії БАС чи зовнішніх завадових чинників, які можуть впливати на ефективність та безпеку комплексу РЕП.

Приватні ТТХ БПЛА у складі показників його розвідувальної захищеності як об'єкта локалізація за напрямом, висотою, дальністю та швидкістю та об'єкта сигнатур його ліній зв'язку КРУ та навігації місцевої ССРН, що використовує БПЛА (таблиця, етап 1), залежать від певних приватних ТТХ відповідно: надширокосмугової (НШС) оглядової маловисотної РЛС та пасивного пеленгатора з кутовим різницево-далекомірним методом вимірювання; засобів радіотехнічної та радіоелектронної розвідки зі складу комплексу РЕП. Розвідувальні засоби пасивного виявлення радіочастот радіоліній передачі даних є важливими складовими частинами захисту від повітряних загроз БАС як джерела даних для радіоелектронного придушення цих радіоліній. Вони також є однією з небагатьох можливостей безпосереднього визначення місцезнаходження НПУ, моніторингу того, на що дивиться його оператор, та взяття під контроль траєкторію польоту безпілота. Аналіз розвідувальної захищеності БАС від засобів розвідки і далі від можливостей засобів радіоелектронного придушення комплексу РЕП дозволяє зробити висновок, що ймовірність РЕП різних радіовипромінюю-

чих засобів КРУ по робочому діапазону, потужності випромінювання та роду зв'язку буде різною, що є основою ступенів невизначеності станів локації БПЛА, ЕМО та СІСПІО та побудови стратегії застосування розвідувальних засобів та видів радіоелектронного придушення. Це також впливає на процедури уточнення даних розвідки та вибір параметрів для керування засобами придушення.

Склад та співвідношення показників зазначених приватних ТТХ БПЛА і засобів розвідки характеризує не тільки якість ситуаційної обізнаності, а і характер її змін. Врахування факторів ситуаційної обізнаності допомагає забезпечити ефективність пристосовування засобів комплексу РЕП на етапах функціонування до різних сценаріїв їх використання, включаючи підвищену гнучкість управління та реакцію на зміни умов спостереження та придушення БПЛА.

Головна мета ситуаційного управління на цьому етапі є:

- подолання розвідувальної захищеності БАС та досягнення необхідного рівня якості ситуаційної обізнаності комплексу РЕП через вибір певних приватних ТТХ контурів циклу управління задіяними засобами розвідки;

- формування управляючих даних, структурованих на основі складових інформаційного опису КС та потреби етапів функціонування комплексу, з наступною передачею їх в контури циклів управління засобами розвідки, видами придушення з фіксацією фактичного рівня невизначеності сигнатур БПЛА та моментів часу їх передачі.

Розгляд особливостей формалізації процесів управління засобами різних видів розвідки виконується з урахуванням умов виявлення БПЛА, ведення розвідки його характеристик та інтегрування отриманих результатів. Це завдання є комплексним, для вирішення якого необхідно декомпонувати та розв'язати окремі функціональні задачі. Першою задачею є пошук, виявлення і локалізація малого БПЛА як аеродинамічної цілі в циклах управління НШС оглядовою маловисотною РЛС зі стохастичними зондуючими сигналами, яка найкращим чином враховує особливості далекого (раннього) виявлення малого БПЛА, і пасивним пеленгатором с кутовим різницево-далекомірним методом вимірювання. Пошук управлінських рішень виконується відповідно до виразу (1) з використанням пов'язаних з ним критеріїв, що враховують показники приватних ТТХ задіяних засобів розвідки з точки зору встановлення вимог до них з урахуванням даних геометрії взаємного розташування їх та БПЛА.

У разі виявлення БПЛА дані його локалізації передаються в контури циклів управління відповідно засобами РТР і РЕР з урахуванням характеру застосованих режимів дистанційного управління польотом БПЛА. Ці контури управління здійснюють за аналогією з першою задачею управління пошук та розкриття характеристик радіоліній зв'язку КРУ та навігації виявленого БПЛА у вигляді розвідувальних даних стосовно вхідних складових конфліктної ситуації з урахуванням ступеню їх невизначеності. Розвідані таким чином сигнатури ЕМО та СІСПІО використовуються як джерела інформації для управління засобами розвідки та придушення, їх об'єднання за повної визначеності параметрів локації БПЛА у зоні відповідальності комплексу РЕП.

Критерієм якості ситуаційної обізнаності є своєчасність, повнота, достовірність та точність інформаційного опису сигнатур БПЛА, що досягається складом та співвідношенням приватних ТТХ, необхідним підвищенням значень показників приватних ТТХ, які пред'являються до інформаційних, керуючих та виконавчих засобів відповідних контурів управління (таблиця, етап 1).

Контури циклів ситуаційного управління етапу 1 функціонують безперервно, отримуючи первинні дані, уточнюючи їх в процесі спостереження за БПЛА, виявляючи нові дані.

Зазначимо також, що на цьому етапі є можливість застосування для поліпшення характеристик виявлення методу комплексного виявлення-розпізнавання, ідентифікації типів БПЛА за сукупністю ознак сигнатур локації, ЕМО та СІСПІО.

2. Цикли ситуаційного управління фізичним сигнальним придушенням БПЛА прицільними за напрямом загороджувальними та імітаційними видами активних завад

Головна мета управління на цьому етапі: подолання завадозахищеності ліній зв'язку КРУ та радіонавігації БПЛА засобами генерації та постановки активних завад, використання сигнатури ЕМО для управління процесами фізичного сигнального придушення БПЛА, а також застосування НШС оглядової маловисотної РЛС для контролю траєкторії польоту БПЛА в процесі його придушення.

Для фізичного сигнального придушення БПЛА застосовуються засоби генерації та постановки різних видів загороджувальних за частотою та часом завад та імітаційних (сигналоподібних) завад та їх комбінації, що передбачає застосування певних відповідних циклів ситуаційного управління. Контури управління зазначених засобів придушення працюють з моменту надходження первинних даних управління про сигнатури локації та ЕМО БПЛА з урахуванням ступеня їх невизначеності. Управління далі коригується у міру уточнення та надходження нових даних. Опис стану конфліктної ситуації на етапі задається відповідно до таблиці, етап 2 при допущенні повної визначеності параметрів локації БПЛА.

Робота засобів придушення БПЛА вкругову через невизначеність просторово-частотного опису розташування БПЛА ($j=1$) не розглядається.

Передбачаються такі можливі сценарії застосування засобів придушення залежно від виду пригнічуваної лінії радіозв'язку або радіонавігації та ступеня невизначеності стану ЕМО виявленого БПЛА – постановки у напрямку БПЛА: загороджувальних завад у разі нерозкриття ($l=1$), часткового розкриття ($l=2$) стану ЕМО; імітаційних завад у випадку розкриття ($l=3$) прицільно на вразливі місця окремих радіоліній та їх комбінації з метою поєднання їх можливостей для підвищення результативності фізичного сигнального придушення.

Аналіз подолання розвідувальної захищеності випромінювальних засобів ліній зв'язку КРУ та радіонавігації БПЛА засобами розвідки та завадозахищеності зазначених радіоліній засобами радіоелектронного фізичного сигнального придушення дозволяє зробити висновок, що радіоелектронна протидія комплексу РЕП різним радіолініям БПЛА за робочою дальністю, потужністю випромінювання та типом зв'язку буде відрізнятися. Це впливає на вибір видів завад та формування їх комбінацій. При цьому враховується вплив геометрії взаємного розташування БПЛА та засобів придушення комплексу РЕП на склад та співвідношення їх приватних ТТХ.

Побудова контурів циклів управління виконавчими засобами фізичного сигнального придушення БПЛА для зазначених сценаріїв виконується за виразом (1) аналогічно попередньому етапу, але з використанням інших певних приватних ТТХ з таблиці, етап 2 щодо виду пригнічуваної лінії радіозв'язку або радіонавігації для завдання критеріїв постановки задач управління засобами придушення та пошуку їх рішень.

Таблиця
Перелік критично важливих для комплексу РЕП приватних ГТХ та їх показників для основних етапів його функціонування

Етап 1	
Приватні ГТХ БАС	Приватні ГТХ контурів циклів ситуаційного управління засобами розвідки (за умов виконання показників приватних ГТХ інформаційних та керуючих засобів контурів відповідних циклів управління)
Склад показників розвідувальної захищеності БПЛА: його локалізації за напрямом, висотою, дальністю та швидкістю як радіолокаційного об'єкта та пасивного пеленгатору – характеризується малим розміром (малопомітністю), малими висотою польоту і швидкістю, маневреністю та віддаленістю від НПУ, режимами радіомовчання та автотомності польоту; сигнатур його ліній зв'язку КРУ та навігації місцевої ССРН, що використовує БПЛА: - як об'єкта засобів РТР – характеризується ймовірністю енергетичної та структурної скритності сигналних форм та параметрів окремих ліній зв'язку КРУ та радіонавігації, а також ступенями невизначеності інформаційного опису динамічного стану створеної ними електромагнітної обстановки (ЕМО) – структурно-параметричного електромагнітного портрета БПЛА; - як об'єкта засобів РЕП – характеризується ймовірностями структурних скритностей адресних та структурно-каналних ознак шифрованих інформаційних повідомлень, протоколів інформаційного обміну, часу та місця обміну інформацією, її змісту та приналежності до елементів КРУ та радіонавігації, а також ступеня невизначеності інформаційного опису динамічного стану сукупності інформаційних повідомлень та протоколів інформаційного обміну (СПІНО) – параметричного інформаційного портрета БПЛА.	
	<p>Приватні ГТХ контурів циклів ситуаційного управління засобами розвідки (за умов виконання показників приватних ГТХ інформаційних та керуючих засобів контурів відповідних циклів управління)</p> <p>ГТХ НШС РЛС для розвідки локації БПЛА – його просторово-часового становища БПЛА. ГТХ всепогодної оглядової НШС РЛС зі стохастичними зондуючими сигналами та низькою ймовірністю перехоплення її сигналів:</p> <ul style="list-style-type: none"> - роздільні можливості РЛС по координатам; - ймовірність правильного виявлення заданого типу малого БПЛА при заданій ймовірності хибної тривоги; - діапазон та точності оцінювання конкретного параметра луна-сигналу, координат та параметрів траєкторії польоту БПЛА – середньо-квадратичні помилки (СКП) вимірювання; - ймовірності правильного та помилкового розпізнавання типу БПЛА; - ймовірність перехоплення засобами РТР зондувальних сигналів; - контроль дальності та моменту часу виявлення БПЛА. <p>ГТХ пасивного пеленгатору з кутвим різницево-далекомірним методом вимірювання</p> <ul style="list-style-type: none"> - діапазон та точності (СКП -середньо-квадратична похибка) вимірювання кутових координат БПЛА; - контроль дальності та моменту часу пеленгування конкретного типу малого БПЛА. <p>ГТХ засобів РТР структур та параметрів сигналних форм окремих радіоліній зв'язку та радіонавігації БПЛА:</p> <ul style="list-style-type: none"> - оцінка умов збігу селективних параметрів радіовипромінювань БПЛА та селективних характеристик засобів РТР. Врахування помилок, що виникають при налаштуванні засобу РТР і які оцінюються похибками вимірювання: робочої частоти ліній зв'язку КРУ, навігації БПЛА, неточністю пеленгації пригніченого БПЛА та системи управління рухом антени засобів РТР по азимуту та куту місця; - ймовірність виявлення сигналу у тому чи іншому частотному діапазоні (подолання енергетичної скритності випромінювання) при заданій ймовірності хибної тривоги за заданий час; - ймовірність розкриття структури сигнальної форми та її параметрів (подолання структурної скритності випромінювання) за заданий час; - діапазони та точності (СКП) виміру параметрів сигнальної форми випромінювання, необхідних для управління засобами фізичного сигнального придушення; - показник ідентифікації джерела радіовипромінювання БПЛА як його радіолінії; - ймовірність розпізнавання класу або типу малого БПЛА з алфавіту класів БПЛА за ознаками сигналів ліній зв'язку КРУ БПЛА; - дані геометрії взаємного розташування БПЛА і засобів розвідки комплексу РЕП в зоні його відповідальності для розрахунків показників ГТХ; - контроль дальності моментів часу подолання розвідзахисності ліній зв'язку КРУ та радіонавігації БПЛА; - оцінка передбачуваного інтервалу часу оперативної стабільності випромінювань БПЛА. <p>ГТХ засобів РЕП структур та параметрів інформаційних повідомлень та протоколів інформаційного обміну окремих конкретних ліній зв'язку БПЛА:</p> <ul style="list-style-type: none"> - оцінка умов збігу селективних параметрів інформаційних повідомлень та протоколів інформаційного обміну у випромінюваннях БПЛА та селективних характеристик засобів РЕП;

<p>Градації невизначеності через відмінності розв'язуваності радіоліній навігації та зв'язку БАС, а також ймовірність виконання умови збігу селективних параметрів випромінювань БПЛА та видів селекції засобів розвідки: нерозкрита (I=1), частково розкрита (I=2) та розкрита-відкрита (I=3)</p>	<p>- ймовірність розкриття структури, параметрів інформаційних повідомлень та протоколів інформаційного обміну (подолання їхньої структурної скритності) за заданий час; - діапазони та точності (СКП) виміру параметрів структури інформаційних повідомлень та протоколів інформаційного обміну, необхідних для управління засобами прихованого інформаційного РЕП; - контроль дальностей та моментів часу подолання розвідзахисності інформаційних повідомлень та протоколів інформаційного обміну в лініях зв'язку КРУ та навігації БПЛА; - оцінка передбачуваного часу оперативної цінності інформації, що передається; - контроль траєкторії польоту БПЛА у процесі пізнання ситуаційної обізнаності за допомогою застосування оглядової НШС РЛС.</p>
<p>Етап 2</p>	
<p>Завадозахищеність ліній зв'язку КРУ БПЛА та навігації місцевої РСРН (як здатність їх технічних засобів прийому та обробки сигналів виконувати свої функції з необхідною якістю в заданих умовах впливу завад та застосування засобів завадозахисту).</p>	<p>- оцінка умов збігу видів селекції пристроїв прийому та обробки сигналів в БАС та селективних параметрів засобів наведення завадових випромінювань, зокрема: а) ймовірностей збігу: діапазонів робочих частот засобів РЕП та ліній зв'язку та навігації БАС; діаграм спрямованості антен засобів РЕП та в лініях зв'язку КРУ; часу пошуку та часу роботи ліній зв'язку КРУ на випромінювання; б) мінімізації помилок, що виникають при налаштуванні засобів РЕП і які оцінюються похибками вимірювання: робочої частоти ліній зв'язку КРУ, навігації БПЛА, неточністю установки частоти засобів РЕП; точністю прицілювання завад у напрямку, яка залежить від точності пеленгації пригніченого БПЛА та системи управління рухом антен засобів придушення по азимуту та куту місця; - оцінка ступеня невизначеності динамічного стану ЕМО на основі аналізу та прогнозу її змін, враховуючи відмінності в розвід- та завадозахищеності радіоліній; - дані геометрії взаємного розташування БПЛА і засобів розвідки комплексу РЕП в зоні його відповідальності для розрахунків показників ТТХ; - критерії управління при цьому використовує показники придушення щодо виду лінії зв'язку або радіонавігації, що придушується, у разі застосування видів: потужних загорджувальних завад з маскувальним ефектом впливу: - показник ступеня впливу загорджувальної завади, який оцінюється сукупністю традиційних коефіцієнтів придушення радіоліній БПЛА у тому чи іншому частотному діапазоні з урахуванням сукупності коефіцієнтів селективності радіоліній БПЛА у разі розбіжностей параметрів селекції за напрямом, частотної, часової та статистичної селекції на виході кореляційного приймача та параметрів завад; - показник впливу завад на спотворення символів шифрованих інформаційних повідомлень, що передаються, або порушення шифрів в лініях зв'язку КРУ і навігації БПЛА, а також на швидкість передачі даних; - показник підвищення глибини придушення за рахунок управління параметрами завад за даними змін визначеності стану ЕМО на основі аналізу та прогнозу цих змін; - контроль дальності (моментів часу) енергетичного придушення загорджувальною завадою ліній зв'язку КРУ та навігації БПЛА при використанні конкретного виду завади та вказівці специфіки її постановки.</p>

<p>Імітаційних (малопотужних сигналоподібних) завод:</p> <ul style="list-style-type: none"> - показники оцінки ефекту впливу імітаційної завади – показники ефекту внесення хибної інформації засобам прийому та обробки сигналів в лінії радіозв'язку та радіонавігації БПЛА; а) коефіцієнт енергетичного придушення, близький до 1; б) коефіцієнт кореляції структури завади із структурою сигналу лінії зв'язку або навігації БПЛА; в) оцінка ступеня безпеки для лінії зв'язку КРУ та навігації БПЛА за рахунок внесення хибної інформації або оцінка ефективності внесення хибної інформації в сигнали цих ліній в межах часу оперативної цінності інформації, що передається; - контроль дальності (моментів часу) фізичного сигнального придушення ліній зв'язку КРУ та навігації БПЛА з внесенням хибної інформації певної спрямованості при використанні конкретних видів імітаційних активних завод з зазначенням специфіки їх постановки; - контроль траєкторії польоту БПЛА у процесі придушення застосуванням оглядової НШС РЛС. 	
Етап 3	
<ul style="list-style-type: none"> - оцінка умов збігу видів селекції та селективних параметрів пристроїв прийому та обробки сигналів БПЛА, пристроїв передачі інформаційних повідомлень у радіолініях БПЛА та селективних параметрів наведення імітаційних завод, а також характеристик видів селекції та селективних параметрів формування інформаційно-технологічних впливів (хибних інформаційних повідомлень та протоколів обміну інформацією в лініях зв'язку КРУ та навігації БПЛА); - ймовірні показники структурної скритності інформаційного повідомлення та самого інформаційного обміну, що характеризують властивість радіоліній КРУ зберігати у тасмниці від комплексу РЭП структуру та параметри інформаційного повідомлення, факту, часу та місця обміну інформацією, а також її вміст і належність до її елементів; - показники ефекту внесення хибної інформації в інформаційний обмін шляхом імітації чи підміни інформаційного повідомлення в межах часу існування скритої корисної інформації в радіолініях БАС; - контроль часу оперативної цінності інформації, що передається; - контроль дальності (моментів часу) внесення скритного інформаційного повідомлення до лінії зв'язку КРУ чи навігації БПЛА з внесенням хибної інформації визначеної спрямованості для інформаційного обміну при використанні конкретних комбінацій видів імітаційних активних завод та ІТВ з урахуванням заданих специфік їх постановки; - контроль траєкторії польоту БПЛА у процесі придушення застосуванням оглядової НШС РЛС. 	<p>Завадозахищеність засобів передачі шифрованих інформаційних повідомлень (достовірність символів та швидкість переданих шифрованих інформаційних повідомлень) у лініях зв'язку КРУ БПЛА та навігації місцевої РСРН при постановці імітаційних видів завод.</p> <p>Імітозахищеність (криптостійкість) засобів передачі шифрованих інформаційних повідомлень та протоколів інформаційного обміну при постановці інформаційно-технологічних впливів (ІТВ).</p> <p>Градация невизначеності: нерозкрита (l=1), частково розкрита (l=2) та розкрита-відкрита (l=3).</p>

Слід зазначити, що у разі постановки тієї чи іншої сигналоподібної завади з рівнем потужності, що відповідає рівню потужності корисного сигналу на борту БПЛА, виникають труднощі аналітичної оцінки дії внесеної нею хибної інформації до бортових трактів прийому та обробки сигналів. Це робить необхідним у процесі управління, крім розрахунків оцінок коефіцієнтів кореляції структур застосовуваних видів імітаційних завад з відповідними реальними сигналами в лініях радіозв'язку КРУ та радіонавігації БПЛА, використовувати попередні результати застосування для цього статистичного імітаційно-математичного методу стосовно того чи іншого виду імітаційної завади, а також залучення його до процесів управління безпосередньо в динаміці конфлікту.

У разі змішаної ситуації зі ступенями невизначеності стану ЕМО та постановки комбінацій загороджувальних та імітаційних завад результативність їх використання буде визначатися набором показників приватних ТТХ відповідно до наведених сценаріїв щодо придушення тих чи інших ліній радіозв'язку КРУ та радіонавігації БПЛА.

Визначено важливим застосування НШС оглядової маловисотної РЛС для об'єктивного контролю траєкторії польоту малого БПЛА в процесі його радіоелектронного придушення у зв'язку низькою визначеністю інших явних наслідків придушення БПЛА і напрямків його дій при переході у режим автономного польоту.

3. Цикли ситуаційного управління прихованим інформаційним придушенням інформаційних повідомлень та протоколів інформаційного обміну БПЛА із застосуванням інформаційно-технологічних впливів

Головна мета управління на цьому етапі: подолання завадо- та імітозахищеності засобів передачі шифрованих інформаційних повідомлень та протоколів інформаційного обміну у лініях зв'язку КРУ та навігації ССРН при постановці сигналоподібних завад та інформаційно-технологічних впливів (ІТВ), використання сигнатури СПППО для управління процесами зкритого інформаційного придушення БПЛА, а також застосування НШС оглядової маловисотної РЛС для контролю траєкторії польоту БПЛА в процесі його придушення.

Радіоелектронне придушення КРУ на етапі 2 може зменшити ймовірність успішного виконання БПЛА цільового завдання, але не забезпечує однозначних дій стосовно припинення його польоту у напрямку контрольованої зони. Зазвичай, відсутність зовнішнього управління призводить до переходу БПЛА в автономний режим, в якому його дії визначаються вбудованою програмою автономного польоту. Програма ця може скоріше передбачати продовження польоту до об'єкту розвідки чи враження та виконання цільового завдання, використовуючи доступні засоби навігації. Тому важливо використати можливості потайного інформаційного придушення БПЛА та зробити малий БПЛА не лише некерованим (порушити роботу його КРУ), але й доступним для перехоплення його управління (з метою керування припинення його польоту) в системі управління БАС в структурі НПУ.

Для цього виду придушення БПЛА застосовуються засоби генерації (або перевипромінювачі) та постановки різних видів сигналоподібних завад у напрямку БПЛА, пристрій формування видів ІТВ і підтримки ІТВ у процесі їх постановки та пристрій внесення ІТВ з хибною інформацією до структури сигналоподібної завади тієї чи іншої радіолінії БПЛА. Це передбачає також застосування певних циклів ситуаційного зовнішнього управління.

Методика прихованого зовнішнього управління траєкторію польоту маневреного малого БПЛА в контурах цих циклів управління має поєднувати взаємопов'язаність поточних процесів наведення БПЛА та синтезу алгоритмів автоматизованого управління радіоелектронною протидією з використанням комбінацій сигнальноподібних завад та ІТВ в умовах повної розвідувальної доступності БПЛА, його характеристик ліній радіозв'язку та радіонавігації у вигляді сигнатур БПЛА – локації, ЕМО та СПППО. Тому формування представлення про поточні процеси управління БПЛА та синтез алгоритмів управління його прихованим інформаційним придушенням мають відбуватися паралельно та взаємопов'язано з моменту надходження даних управління від засобів розвідки комплексу РЕП. Описи стану конфліктної

ситуації на етапі задається відповідно до складових таблиці, етап 3 при допущенні повної визначеності приватних ТТХ контурів циклів ситуаційного управління засобами розвідки та придушення за умов виконання показників приватних ТТХ інформаційних та керуючих засобів контурів відповідних циклів управління.

Для етапу 3 ключову роль грають наступні особливості:

- досягнуті результати протидії попередніх етапів функціонування комплексу РЕП, розкриті види вразливості шифрованих інформаційних повідомлень, протоколів управління та навігації, що застосовуються на малих БПЛА і які використовуються для підготовки спеціальних хибних даних (інформаційних заготовок) з метою імітації або підміни інформаційних повідомлень в радіолініях БПЛА та отримання контролю управління ним шляхом їх радіопередачі у вигляді ІТВ;

- види ІТВ, які вбудовуються у відповідну структуру сигналоподібної завади – прицільної за частотою і структурою сигналу тієї чи іншої лінії радіозв'язку або радіонавігації БПЛА, яка характеризується високою ймовірністю збігу за структурою і форматом даних, що передаються в цих радіолініях зв'язку і навігації. ІТВ використовує вразливості іміто(криптографічної) захищеності, можливості доступу до керування за рахунок злому шифрованої радіолінії, імітації або підміни даних авторизації, а також уразливості алгоритмів прийняття рішень в системі управління БАС в структурі НПУ;

- очікувані ефекти нав'язування йому хибних режимів роботи КРУ або його польоту;

- побудова контурів циклів управління виконавчими засобами прихованого інформаційного придушення БПЛА, що виконується за виразом (1) аналогічно попереднім етапам, але з використанням інших певних приватних ТТХ щодо виду пригнічуваної лінії радіозв'язку або радіонавігації з таблиці, етап 3 для завдання критеріїв постановки задач управління та пошуку рішень.

Між тим, слід зазначити, що у разі постановки тієї чи іншої комбінації сигналоподібної завади та ІТВ, виникають труднощі аналітичної оцінки дії внесеної ними хибної інформації. Це робить необхідним, як і на етапі 2, використання у процесі управління попередніх результатів застосування для цього статистичного імітаційно-математичного методу дослідження властивостей використовуваної комбінації імітаційної завади та ІТВ, а також залучення його до процесів управління безпосередньо в динаміці конфлікту. Тобто, передбачається використання заздалегідь спеціально підготовленої обманної інформації, що базується на застосуванні сучасних інформаційних технологій та наступної послідовності дій:

- використання результатів моделювання двосторонньої динаміки конфліктної взаємодії на етапах функціонування комплексу РЕП, особливо в інформаційній сфері, та відображення конфліктних станів та можливих варіантів дій протиборчих сторін (підсистеми моделювання дій БПЛА та моделювання своїх дій);

- виборі та розробці плану обману системи управління БАС про реальний стан конфліктної ситуації, оцінки розміру, часу та порядку впровадження обманних дій;

- підтримці цієї обманної інформації діями безпосередньо в процесі конфліктної взаємодії на основі результатів моделювання інформаційного протиборства в підсистемі моделювання забезпечення прийняття рішення, а також за допомогою порад системи підтримки прийняття рішень у процесах фізичного сигнального та прихованого інформаційного придушення, які дозволять не тільки відстежувати дії БПЛА та реагувати на них, попереджати його наміри і постійно вводити його в оману, але й узгодити та ув'язати за цілями, завданнями, місцем, часом та способом впливу комплексу РЕП на стан польоту БПЛА.

Визначено важливим застосування НШС оглядової маловисотної РЛС для об'єктивного контролю нав'язаних засобами інформаційного придушення змін траєкторії польоту малого БПЛА та у зв'язку з невизначеністю напрямків його дій при переході у режим автономного польоту.

Висновки

Показано можливість досягнення конфліктних переваг комплексу РЕП в динаміці конфлікту з малою безпіотною системою за рахунок покращення його керованості внаслідок поліпшення рівня формалізації процесів забезпечення результативності на основних етапах його функціонування. Розглянуто, поряд з загальними особливостями формалізації циклів внутрішньо етапного когнітивного ситуаційного управління комплексу РЕП, ряд її відмінностей при побудові контурів управління для окремих етапів. Вони стосуються отримання якісного інформаційного опису конфліктних ситуацій при формуванні ситуаційної обізнаності, обґрунтованого вибору складу та оптимізації порядку застосування ефективних технічних виконавчих засобів розвідки та різних видів придушення у контурах циклів управління ними. При цьому використовується сформований критично важливий для БАС та комплексу РЕП певний перелік приватних ТТХ та значень їх показників, як системний інструмент формалізації опису конфліктної ситуації та циклів управління для її вирішення, що має певні відмінності та співвідношення на окремих етапах.

Сформований перелік показників ключових приватних ТТХ об'єктивно відображає умови та результати застосування засобів спостереження та протидії комплексу РЕП малій БАС на основних етапах його функціонування. Послідовність їх застосування комплексно охоплює основні складові, що впливають на якість функціонування відповідних засобів контурів циклів внутрішньо етапного ситуаційного управління комплексу РЕП. Так, він забезпечує:

- аналізу умов спостереження і придушення малого БПЛА як прицільно кожної з його радіоліній зв'язку командної радіолінії управління (КРУ) і навігації місцевої ССРН, що використовує БПЛА, так і сукупності цих радіоліній, а також алгоритмів прийняття рішень в системі управління БАС в цілому з урахуванням характеристик їх вразливостей;

- вибір та застосування:

а) різних комбінацій певних засобів розвідки характеристик БПЛА в залежності від умов та результатів спостереження БПЛА;

б) прицільних за напрямком різних видів загороджувальних за частотою і часом, імітаційних (сигналоподібних) активних завад, та їх комбінацій для фізичного придушення радіосигналів КРУ, ССРН;

г) прицільних за напрямком змішаних комбінацій різних сигналоподібних завад і інформаційно-технологічних впливів (ІТВ), комбінацій окремих ІТВ на процеси управління в БАС для потайного інформаційного придушення БПЛА з метою порушення передбачуваної роботи його КРУ чи перехоплення управління БПЛА для цілеспрямованого припинення його польоту.

Підвищення вимог до приватних ТТХ, узгоджених з вразливостями БАС, та обмеження на витрати матеріального ресурсу і дефіцит часу є джерелами пошуку шляхів ефективного вирішення проблем своєчасного (раннього) виявлення малих БПЛА та поетапної реалізації різних видів їх придушення, що наростаюче посилюються, із урахуванням специфіки та тактики застосування БАС.

Список літератури:

1. Generation of Counter UAS Systems to Defeat of Low Slow and Small (LSS) Air Threats. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1152139.pdf>

2. Американська класифікація БПЛА. [Електронний ресурс]. URL: <https://armyinform.com.ua/2020/03/11/standarty-nato-v-galuzi-bezpilotnoyi-aviacziyi/>

3. Мищенко І.М., Педенко Ю.О., Роєнко О.М. Про можливість захисту БПЛА від придушення сигналів управління // Радіотехніка. 2024. Вип. 217. С. 133–138.

4. Методичні рекомендації «Щодо радіоелектронної протидії безпілотним літальним апаратам «Ланцет» / Головне управління радіоелектронної та кіберборотьби Генерального штабу Збройних Сил України, Житомирський військовий ін-т ім. С. П. Корольова, 2023. 23 с. <https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2023/03/>

5. Радіоелектронна протидія безпілотним апаратам «Ланцет» // Електронний ресурс: <https://sprotyvg7.com.ua/lesson/radioelektronna-protidii-bezpilotnim-litalnim-apatam-lancet>.

6. Ярош С.П., Гур'єв Д.О. Впровадження специфічних способів і засобів протидії безпілотним літальним апаратами в групуванні зенітних ракетних військ // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2022. № 2(47). С. 47–61. DOI: 10.30748/nitps.2022.47.05
7. Лещенко С. П., Адаменко А. А., Лупандін В. А., Мегельбей Г. В. Система інформаційного забезпечення протидії безпілотним літальним апаратам противника при комплексному застосуванні засобів радіоелектронної боротьби // Зб. наук. пр. Харків. нац. ун-ту Повітряних Сил. 2022. № 3 (73). С. 31–37. <https://doi.org/10.30748/zhups.2022.73.05>.
8. Лупандін В. А., Сотніков О. М., Мегельбей Г. В., Танцюра О. Б. Модель захисту об'єктів і військової техніки від роїв безпілотних літальних апаратів // Системи обробки інформації. 2022. № 4 (171). С. 41–47. doi.org/10.30748/soi.2022.171.04.
9. Системи РЕБ та РЕР: що потрібно Україні та які її можливості в цьому напрямку // Електронний ресурс: <https://finance.ua/goodtoknow/yakykh-system-REB-ta-RER-potrebuie-Ukraina>
10. Kaidenko M. M., Kravchuk S. O. Protection against the effect of different classes of attacks on UAV control channels // Information and telecommunication sciences. 2022. Vol. 13, №1. P. 35–43.
11. Kantsedal V. Features of the formalization of situation management cycles of the ground specialized complex of radio electronic countermeasures for small drones // Book of proceedings of the XX International Scientific Conference on Electronics and Applied Physics (APHYS 2024). 22–25 October 2024. Kuiv, Ukraine, Taras Shevchenko National University of Kyiv Faculty of Radio Physics, Electronics and Computer Systems. P. 220–221.
12. Kantsedal V., Mogyla A. A Multifactorial Approach to Building a System for Automated Control of Radar Information Stability / V.Kantsedal, A. Mogyla // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (MRRS) Kharkov, Ukraine, September 21 – 25, Vol. 2. P. 373–378.
13. Kantsedal V. Rationale for construction of the structure of the system for cognitive control of types of signal resource surveillance radar // Book of proceedings of the 19th International Scientific Conference on Electronics and Applied Physics (APHYS 2023). 17–21 October 2023. Kuiv, Ukraine, Taras Shevchenko National University of Kyiv Faculty of Radio Physics, Electronics and Computer Systems. P. 91–92.
14. Kantsedal V., Mogyla A. System advantages and features of the use of stochastic periodic complex pulse radio signals in the sensing modes of a surveillance radar // Book of proceedings of the 19th International Scientific Conference on Electronics and Applied Physics (APHYS 2023). 17–21 October 2023. Kuiv, Ukraine, Taras Shevchenko National University of Kyiv Faculty of Radio Physics, Electronics and Computer Systems. P. 89 –90.
15. Канцедал В.М., Могила А.А. Особливості управління завадо захищеністю оглядової РЛС при її придрушенні активними завадами та інформаційними впливами, що заважають // Радіотехніка. 2021. Вип. 207. С. 89–101.

Надійшла до редколегії 09.10.2024

Відомості про автора:

Канцедал Валерій Михайлович – канд. техн. наук, Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усікова НАН України, старший науковий співробітник; Україна; e-mail: kantsedalvaleri@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4008-917X>

М.В. БУГАЙОВ, канд. техн. наук

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРИЙНЯТОГО СИГНАЛУ ПАНОРАМНИМ ЗАСОБОМ РАДІОМОНІТОРИНГУ НА БЕЗПЛОТНОМУ ЛІТАЛЬНОМУ АПАРАТІ

Вступ

В умовах зростаючої інформатизації усіх галузей науки, техніки та суспільства постійно збільшується кількість радіоелектронних випромінюючих засобів. Такі пристрої мають, як правило, малу потужність випромінювання, а щільність їх розміщення в населених пунктах може бути досить високою. Виявлення таких джерел радіовипромінювання (ДРВ), їх локалізація та оцінювання параметрів за допомогою стаціонарних засобів радіомоніторингу (РМ) буде малоєфективним. В основному це пов'язано із відсутністю енергетичної доступності.

На даний час малорозмірні безпілотні літальні апарати (БпЛА) все частіше використовуються для вирішення завдань збирання даних про навколишнє середовище. Розмістивши на БпЛА засіб РМ, можна реалізувати збирання даних про просторові, частотні та часові параметри ДРВ в деякому обмеженому просторі шляхом його обльоту та аналізу прийнятих сигналів. При цьому накладаються обмеження на час збирання та оброблення даних, що пов'язано із обмеженим часом польоту БпЛА. Передача зібраних даних може проводитися відразу після їх оброблення або оброблені дані можуть накопичуватися на БпЛА. Перший підхід вимагає використання деякого ресурсу часу на передачу, що зменшує час на аналіз сигналів.

Радіомоніторинг із використанням БпЛА ведеться, як правило, в умовах відсутності або неповної інформації щодо кількості, положення та параметрів ДРВ, а також про середовище поширення радіохвиль. Відсутність або неповнота апріорної інформації вимагає створення відповідної математичної моделі, що буде враховувати невідомі параметри ДРВ та середовища поширення радіохвиль, а також постійне переміщення засобу РМ на БпЛА.

Стрімкий розвиток БпЛА стимулює їх впровадження для вирішення найрізноманітніших завдань, зокрема ведення РМ. Даному питанню присвячено велику кількість досліджень. У роботах [1 – 4] описано процедури оптимізації траєкторії польоту БпЛА для дослідження відомих ДРВ, часу сканування та передачі даних про результати вимірювань. У [5] запропоновано стратегію сканування, яка мінімізує витрати часу та ресурсів шляхом знаходження оптимальної комбінації кількості сенсорів. У роботах [6 – 10] розглянуто просторово-часовий аналіз радіочастотного спектра із використанням БпЛА. В [11 – 12] показано, що розміщення засобів РМ на БпЛА зумовлено також пошуком вільних частотних каналів для оптимізації зв'язку між окремими БпЛА під час виконання спільних завдань. Результати моделювання поширення радіохвиль для виділення інформації про параметри середовища та прогнозування потужності прийнятого сигналу наведено у [13]. У [14] описано процес аналізу радіочастотного спектра із використанням рою БпЛА. У [15] запропоновано геостатистичне моделювання покриття бездротових мереж. Метод автоматичної 3D реконструкції місцевості і моделювання поширення радіохвиль із використанням алгоритмів машинного навчання запропоновано у [16]. У [17] наведено підхід до реконструкції радіочастотної картини в тривимірному просторі, включаючи коригування траєкторії польоту БпЛА [18]. Систему спектрального картографування за допомогою БпЛА та алгоритм реконструкції спектральних даних і моделі каналу наведено у [19]. Проте у наведених роботах не розглядаються питання математичного моделювання прийнятого сигналу в умовах панорамного аналізу РЧС та обмеженого ресурсу часу на обліт заданої області простору і оцінювання потужності ДРВ.

Метою статті є оптимізація процесу аналізу електромагнітної обстановки із використанням розміщеного на БпЛА панорамного засобу РМ шляхом побудови математичної моделі прийнятого сигналу, що враховує ефекти поширення радіохвиль спричинені переміщенням БпЛА.

Вплив каналу на поширення радіосигналів

Для проведення дослідження виділимо три групи параметрів, що характеризують процес РМ із використанням БпЛА під час польоту: параметри засобу РМ, ДРВ та каналу поширення сигналу. Засіб РМ можна описати такими параметрами: смуга пропускання та чутливість приймача, швидкість сканування, форма діаграми спрямованості (ДС) антени. Також на процес РМ впливатиме швидкість та траєкторія руху БпЛА. До параметрів ДРВ будемо відносити: координати ДРВ, потужність випромінювання, частотно-часові параметри сигналів, форму та орієнтацію в просторі ДС антени, швидкість руху ДРВ. Канал поширення радіохвиль будемо характеризувати ступенем прояву ефектів відбиття, дифракції, розсіювання та інтерференції в різних діапазонах частот та швидкістю їх зміни при переміщенні БпЛА. У даній роботі обмежимося діапазоном частот від 100 до 6 ГГц. Основними факторами, що впливатимуть на рівень прийнятого сигналу, в даному випадку є втрати на поширення, затінення, завмирання та неізотронність ДС антен ДРВ та БпЛА. Доплерівським зсувом частоти в даних умовах можна знехтувати, оскільки при швидкості руху БпЛА 150 км/год і частоті сигналу ДРВ 6 ГГц зсув частоти не перевищуватиме 1 кГц, що для вирішення завдань виявлення сигналів та оцінювання їх зовнішніх параметрів є несуттєвим.

Моделі втрат на поширення радіохвиль дозволяють враховувати співвідношення між потужностями передавача і прийнятого сигналу в залежності від відстані між ними. Потужність прийнятого сигналу однією антеною за ідеальних умов можна розрахувати із використанням рівняння Фрііса [20]:

$$P_r = P_t G_r(\theta, \gamma) G_t(\theta, \gamma) \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2, \quad (1)$$

де P_t – потужність випромінювання ДРВ; θ, γ – азимут і кут місця відповідно; $G_r(\theta, \gamma)$ – коефіцієнт підсилення антени ДРВ в напрямку на антену засобу РМ; $G_t(\theta, \gamma)$ – коефіцієнт підсилення антени засобу РМ в напрямку на антену ДРВ; λ – робоча довжина хвилі сигналу ДРВ; r – відстань між ДРВ та засобом РМ.

У загальному випадку значення азимуту та кута місця є функціями від часу, що описують взаємне положення ДС антен ДРВ та засобу РМ.

Дане рівняння не враховує наявність перешкод між антенами, багатопроменевого поширення радіохвиль, втрат у фідерах і роз'ємах, та втрат за рахунок неспівпадіння поляризацій, а також інші втрати. Проте у даному дослідженні суттєвою є саме залежність зміни рівня прийнятого сигналу від різних параметрів, а не його абсолютний рівень. Для отримання коректних результатів за виразом (1) засіб РМ повинен знаходитися в дальній зоні (зоні Фраунгофера).

Крім відстані на рівень потужності прийнятого сигналу впливає ряд факторів. Наприклад, між антенами передавача і приймача можуть бути розташовані дерева і будівлі, викликаючи при цьому тимчасове зменшення рівня прийнятого сигналу під час руху БпЛА. У загальному випадку врахувати при моделюванні положення усіх перешкоджаючих об'єктів в області польоту БпЛА неможливо, тому вводять стандартний метод врахування варіацій рівня потужності сигналу на приймачі як випадковий вплив – затінення. Для даного фактора рівень втрат на відстані r можна записати в такому вигляді [21]:

$$L(r) = L(r_0) \left(\frac{r}{r_0} \right)^v \chi, \quad (2)$$

де r_0 – деяка опорна відстань у вільному просторі, на якій втрати сигналу складають $L(r_0)$; v – коефіцієнт втрат на поширення радіохвиль, який залежить від типу навколишнього середовища і знаходиться в межах 2-6; χ – випадкова величина затінення.

У такому разі втрати на поширення радіохвиль можуть розглядатись як середнє значення (2) з дисперсією затінення χ . Оскільки затінення викликають макроскопічні об'єкти, то типова кореляційна відстань складає від одиниць до десятків метрів. Затінення відносять до великомасштабних завмирань.

Значення χ є логарифмічно нормальною випадковою величиною:

$$\chi = 10^{0,1\xi}, \quad (3)$$

де ξ – нормальна випадкова величина із нульовим середнім та середньоквадратичним відхиленням σ_ξ . Типові значення σ_ξ складають 4–13 дБ і також залежать від типу середовища.

Втрати потужності сигналу, що описують виразом (2) підпорядковані логарифмічно-нормальному розподілу [22].

На відміну від втрат на поширення і затінення, які є впливом великомасштабних затухань від навколишніх об'єктів та відстані, найбільш впливовими в системах мобільного зв'язку є маломасштабні завмирання. Серед багатьох фізичних ефектів у радіоканалі на формування маломасштабних завмирань найсильніше впливають багатопроменеве поширення, швидкість руху ДРВ та засобу РМ, швидкість оточуючих об'єктів і ширина смуги передачі сигналу. При дрібномасштабному завмиранні рівень сигналу може змінюватися на 30–40 дБ при переміщенні засобу РМ лише на частину довжини хвилі.

Просторова мінливість сигналу приймачем, що рухається, сприймається як мінливість у часі. Просторову мінливість розділяють на швидкі завмирання, викликані багатопроменевим поширенням, що виникають на деяких довжинах хвиль, та повільні завмирання внаслідок змін затінення. Відбиття сигналу від місцевих предметів можуть бути корисними тим, що усувають до певної міри зони радіотіні.

У масштабі кількох довжин хвиль мінливість сигналу визначається впливом багатопроменевого поширення, що призводить до завмирань, які описують моделями Релея або Райса. Завмирання Релея є прийнятною моделлю, коли багато об'єктів у середовищі відбивають і розсіюють сигнал на його шляху до приймальної антени. Причому між приймальною і передавальною антенами немає прямої видимості. Це характерно для міських або лісових районів. Для випадку завмирань Райса крім перевідбиттів та розсіювання є також пряма видимість між антенами. Завмирання Райса описуються параметром, що визначається співвідношенням потужності складової, яка поширюється в межах прямої видимості, до дисперсії решти багатопроменевих складових [23].

У часовій області завмирання поділяють на швидкі та повільні, що пов'язано із відношенням тривалості пакету даних та швидкості зміни характеристик каналу. У частотній області розрізняють частотно-селективні (для відносно широкосмугових сигналів) та частотно-незалежні завмирання [22].

Більшість радіосистем зв'язку функціонують у складному середовищі поширення хвиль, котре не можливо змоделювати точно, визначаючи траєкторію поширення променів і втрати на трасі поширення. Існують моделі визначення втрат на трасі для прогнозування затухання в типовому робочому середовищі, наприклад для міських і приміських районів. Ці моделі головним чином базуються на даних емпіричних вимірювань із врахуванням частотного діапазону і географічного району [24].

У загальному випадку завмирання можна розглядати як результат впливу на сигнал мультипликативної перешкоди, що призводить до суттєвих коливань потужності прийнятого сигналу.

Моделювання прийнятого сигналу

На антену БпЛА надходить велика кількість радіохвиль від різних ДРВ і різними шляхами за рахунок багатопроменевого поширення. На рис. 1 наведено схему польоту БпЛА із засобом РМ через задану область простору, в якій розміщено кілька ДРВ, причому деякі з них можуть бути рухомими, наприклад інші БпЛА та портативні радіоелектронні засоби.

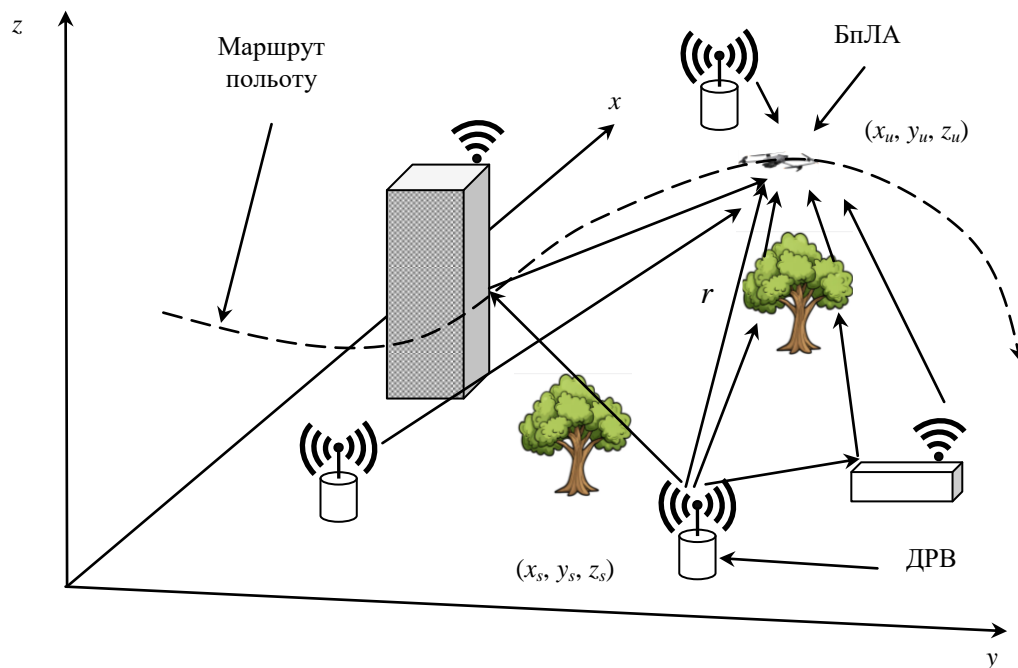


Рис. 1. Взаємне розміщення засобу РМ на БПЛА та ДРВ

Модель багатопроменевого поширення сигналу часто описують із використанням імпульсної характеристики (ІХ) каналу. Втрати сигналу за рахунок згасання та швидких завмирань часто використовують для моделювання впливу велико- та дрібномасштабних флуктуацій прийнятого сигналу. ІХ використовують для опису часових затримок в каналі. Узагальнену модель прийнятого на одну антену засобу РМ сигналу із використанням ІХ каналу можна записати в такому вигляді:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{N_S} s_i(t) * h_i(t) + \xi(t), \quad (4)$$

де N_S – кількість ДРВ; $s_i(t)$ – сигнал i -го ДРВ; $h_i(t)$ – ІХ каналу поширення сигналу від i -го ДРВ до приймальної антени; $\xi(t)$ – внутрішній шум приймача.

Проте, якщо координати БПЛА із засобом РМ в кожен момент часу ще можна визначити, то положення ДРВ відносно як засобу РМ так і інших оточуючих предметів є невідомим. Тому характеристики каналу поширення досить важко спрогнозувати і оцінити їх вплив на рівень прийнятого сигналу. Також за рахунок взаємного переміщення приймача та ДРВ канал поширення можна вважати нестационарним (зі змінними в часі параметрами). Тому ІХ каналу поширення можна записати в такому вигляді [25]:

$$h(t) = \sum_{i=1}^{N_p(t)} \alpha_i(t) \delta(t - t_i(t)) e^{j\varphi_i(t)}, \quad (5)$$

де $N_p(t)$ – кількість променів поширення сигналу в момент часу t ; $\alpha_i(t)$ – амплітуда сигналу в i -му промені в момент часу t ; $t_i(t)$ – затримка сигналу в i -му промені в момент часу t ; $\varphi_i(t)$ – фаза сигналу в i -му промені в момент часу t , що включає набіг фази за рахунок поширення, відбиття та ефекту Доплера; $\delta()$ – дельта-функція.

Зміна фази прийнятого сигналу за рахунок впливу ефекту Доплера можна визначити з такого рівняння:

$$\varphi_{Di}(t) = f_0 \frac{v}{c} \cos \vartheta_i(t), \quad (6)$$

де f_0 – несуча частота радіосигналу; v – швидкість БПЛА; c – швидкість поширення радіохвиль; ϑ_i – кут між вектором швидкості та напрямком поширення радіохвилі.

Параметри IX каналу поширення є випадковими процесами, а їх залежність від часу пояснюється зміною взаємного положення ДРВ та засобу РМ через переміщення останнього, що призводить до змін умов поширення радіохвиль (кількості шляхів поширення, їх характеристик, довжини шляху поширення кожного променя). Варто відмітити, що параметр α змінюється відносно повільно в обмеженій ділянці простору, тоді як φ змінюється суттєво при малих змінах відстані.

З урахуванням виразів (4) та (5) математичну модель прийнятого сигналу можна записати у такому вигляді:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{l=1}^{N_p(t)} \alpha_{il}(t) s_i(t - t_{il}(t)) e^{j(2\pi f_0(t - t_{il}(t)) + \varphi_{il}(t))} + \xi(t), \quad (7)$$

де $\alpha_{il}(t)$ – амплітуда сигналу i -го ДРВ в l -му промені в момент часу t ; $\varphi_{il}(t)$ – фаза сигналу i -го ДРВ в l -му промені в момент часу t .

Затримка часу поширення сигналу по l -му шляху від i -го ДРВ:

$$t_{il}(t) = r_{il}(t)/c, \quad (8)$$

де $r_{il}(t)$ – довжина шляху поширення радіохвилі від i -го ДРВ до засобу РМ по l -шляху.

Дальність прямої видимості між антенами ДРВ та засобу РМ в кожен момент часу можна визначити з рівняння

$$r = \sqrt{(x_s - x_u)^2 + (y_s - y_u)^2 + (z_s - z_u)^2}, \quad (9)$$

де (x_s, y_s, z_s) та (x_u, y_u, z_u) – координати ДРВ та засобу РМ.

Вираз (7) відображає «тонку» структуру прийнятого сигналу, включаючи амплітудно-фазові співвідношення. Складність процесу поширення радіохвиль унеможливило отримання однієї моделі, якою можна було б точно описати втрати сигналу для усіх типів середовищ та діапазонів частот. Тому часто доцільно використати просту модель, яка відображає сутність поширення сигналу, не вдаючись до складних моделей втрат на шляху, які в будь-якому випадку є лише наближенням до реального каналу [26]. Тут же показано, що зміна рівня сигналу в залежності від дальності між передавачем та приймачем визначається такими факторами: втратами на поширення, затінення та завмирання за рахунок багатопроменевого поширення. При цьому припускається, що приймач переміщується зі сталою швидкістю v . Тоді потужність прийнятого сигналу буде в загальному випадку нестационарним процесом.

Для оцінювання потужності прийнятого засобом РМ сигналу з частотою f в момент часу t будемо використовувати модель, що враховує крім IX каналу поширення неізотропність ДС антени ДРВ та засобу РМ:

$$P_r(t, f) = P_t \underbrace{\left(\frac{c}{4\pi r(t) f} \right)^{v(t)}}_1 \underbrace{\frac{1}{\chi(t, f)}}_2 \underbrace{m(t, f)}_3 \underbrace{G_r(\theta(t), \gamma(t)) G_t(\theta(t), \gamma(t))}_4. \quad (10)$$

Математичну модель потужності прийнятого сигналу (10) можна розглядати як добуток чотирьох функцій часу, які змінюються з різною швидкістю:

1 – повільна, що визначається зміною дальності між передавальною і приймальною антенами. При цьому значення коефіцієнта втрат на поширення радіохвиль $v(t)$ змінюється в часі за рахунок переміщення засобу РМ через різні середовища. Відстань між ДРВ та БПЛА $r(t)$ визначається траєкторією його польоту;

2 – швидка, що визначається ефектом затінення.

Просторова коваріація ефекту затінення описується таким виразом [27, 28]:

$$C(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = \sigma_{\xi}^2 e^{-\frac{|\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1|}{r_c}}, \quad (11)$$

де $\mathbf{p}_1 = (x_s, y_s, z_s)$ та $\mathbf{p}_2 = (x_u, y_u, z_u)$; r_c – кореляційна відстань затінення, яка залежить від розміру перешкоди і складає від кількох до десятків метрів.

Під час зміни відстані між ДРВ та засобом РМ дана просторова мінливість змінюється на часову і масштабується швидкістю переміщення БпЛА v :

$$C(t_1, t_2) = \sigma_{\xi}^2 e^{-\frac{v}{r_c} |t_2 - t_1|}; \quad (12)$$

3 – дуже швидко, що визначається багатопробним поширенням.

Для статистичного опису радіоканалу із рухомим приймачем використовують розподіл Релея. Даному розподілу підпорядковуються значення обвідної прийнятого сигналу в каналі без частотно-селективних завмирань, тобто обвідна окремої багатопробної складової. Відомо, що обвідна суми квадратів центральних гаусових випадкових процесів розподілена за законом Релея. Для моделювання завмирань Релея використовують метод Джейка [29]. Низькочастотна комплексна обвідна прийнятого сигналу формується в результаті суперпозиції деякої кількості гармонік N_p з випадковими параметрами:

$$m(t) = \sqrt{s_I^2(t) + s_Q^2(t)}, \quad (13)$$

де дійсна та уявна частину записують відповідно до таких виразів:

$$s_I(t) = \frac{1}{\sqrt{N_p}} \sum_{i=1}^{N_p(t)} I_i \cos(2\pi F_d \cos \vartheta_i t + a_i), \quad s_Q(t) = \frac{1}{\sqrt{N_p}} \sum_{i=1}^{N_p(t)} Q_i \sin(2\pi F_d \cos \vartheta_i t + b_i), \quad (14)$$

де F_d – максимальне значення частоти Доплера; I_i, Q_i – випадкові значення амплітуд гармонік; ϑ_i – кут приходу радіохвилі, a_i, b_i – випадкові значення фаз, що рівномірно розподілені в діапазоні $[0, 2\pi]$.

Для моделювання завмирання Райса використовують суму нецентрально-гаусових випадкових процесів.

Швидкість відносного переміщення засобу РМ та ДРВ визначає наскільки швидко змінюється рівень прийнятого сигналу. Часовий інтервал між мінімумами (максимумами) рівня завмирань складає наближено півперіоду частоти Доплера, що відповідає переміщенню приймача (передавача) на половину довжини хвилі несучої частоти сигналу;

4 – складова впливу неізотропності ДС антен засобу РМ та ДРВ може проявлятися на усі інші складові в залежності від їх форми та параметрів руху БпЛА.

Припускаємо, що ДС антени ДРВ не змінюється в часі. Тоді даний фактор є детермінованим проте невідомим. Ступінь впливу даного чинника на рівень прийнятого сигналу визначається формою ДС та її орієнтацією відносно засобу РМ на БпЛА.

На рис. 2 наведено схему переміщення БпЛА на площині відносно одного ДРВ та пояснення втрат сигналу на різних ділянках траєкторії польоту. Якщо відсутнє затінення, то будемо вважати, що є умови прямої видимості і завмирання, підпорядковані розподілу Райса, які мають меншу глибину порівняно із завмираннями Релея. Також припускаємо, що антена засобу РМ є неспрямованою.

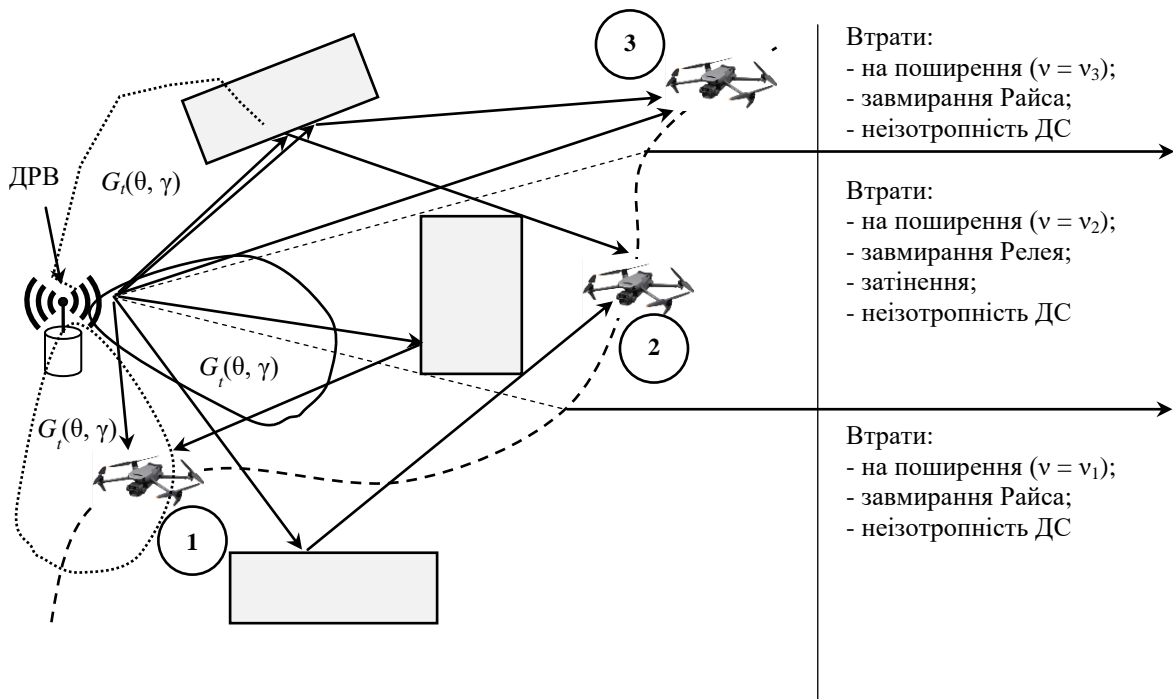


Рис. 2. Схема переміщення БПЛА відносно одного ДРВ

При знаходженні БПЛА із засобом РМ в положенні 1 є умови прямої видимості, він знаходиться найближче до ДРВ та в максимумі ДС його антени. Тому рівень прийнятого сигналу буде високим із незначними пульсаціями, що спричинені завмираннями Райса. У другому положенні відсутня пряма видимість через затінення, що спричинить логарифмічно-нормальне затухання та завмирання Релея. Засіб РМ знаходиться в максимумі ДС. Тому на прийнятий сигнал впливатимуть швидкі та дуже швидкі глибокі завмирання. У третьому положенні між ДРВ та БПЛА є пряма видимість і засіб РМ знаходиться в мінімумі ДС антени ДРВ. Тому в даній точці простору рівень прийнятого сигналу буде невисоким із неглибокими завмираннями Райса. Припускаємо, що середня потужність випромінювання ДРВ P_t не змінюється в часі. Тоді оброблення вимірних значень потужності прийнятого сигналу засобом РМ з урахуванням рельєфу місцевості та розміщення інших об'єктів (будівель, дерев) на маршруті польоту БПЛА дозволить наближено оцінити розміщення ДРВ за умови його незмінного положення. Збільшення кількості прольотів за різними маршрутами дозволить підвищити точність оцінювання координат ДРВ. Припускаємо, що БПЛА рухається без зупинок і на аналіз усієї смуги частот, що підлягає аналізу, виділяється деякий час T_s . За цей час БПЛА пролетить відстань $r_s = v \cdot T_s$. На аналіз одного діапазону частот витрачається час T_0 , причому, як правило, $T_0 \ll T_s$. За час T_0 середовище (умови поширення радіохвиль) не повинно сильно змінитися в плані дрібномасштабних завмирань, щоб не вносилися спотворення у вимірне значення потужності прийнятого сигналу. В такому разі за час аналізу діапазону частот БПЛА повинен переміститися на відстань, що значно менше половини довжини хвилі. За такого підходу T_0 можна розрахувати відповідно до виразу

$$T_0 \ll \frac{\lambda}{2v} \approx \frac{c}{20vf_0}. \quad (15)$$

Проте розраховане таким чином значення T_0 не забезпечить стійкості оцінок значень рівня прийнятого сигналу. При послідовному скануванні смуги частот аналізу кожного разу при аналізі діапазону з центральною частотою f_0 антена засобу РМ на БПЛА може знаходитися як в мінімумі, так і в максимумі електромагнітного поля, що пов'язано з дрібномасштабними завмираннями. Для забезпечення більшої стійкості оцінок рівня сигналу значення T_0 можна обрати виходячи з такої умови:

$$T_0 \gg \frac{\lambda}{2v} \approx \frac{5c}{vf_0}. \quad (16)$$

Такий підхід забезпечить усереднення потужності прийнятого сигналу приблизно за 10 періодами завмирань, спричинених багатопробним поширенням. Отримане таким чином значення рівня прийнятого сигналу буде наближено відображати втрати сигналу на поширення та затінення (рис. 3). На даному рисунку відображено умовну залежність втрат сигналу від відстані між ДРВ та БпЛА для таких значень параметрів: $f_0 = 900$ МГц; $v = 150$ км/год; $N_p = 10$.

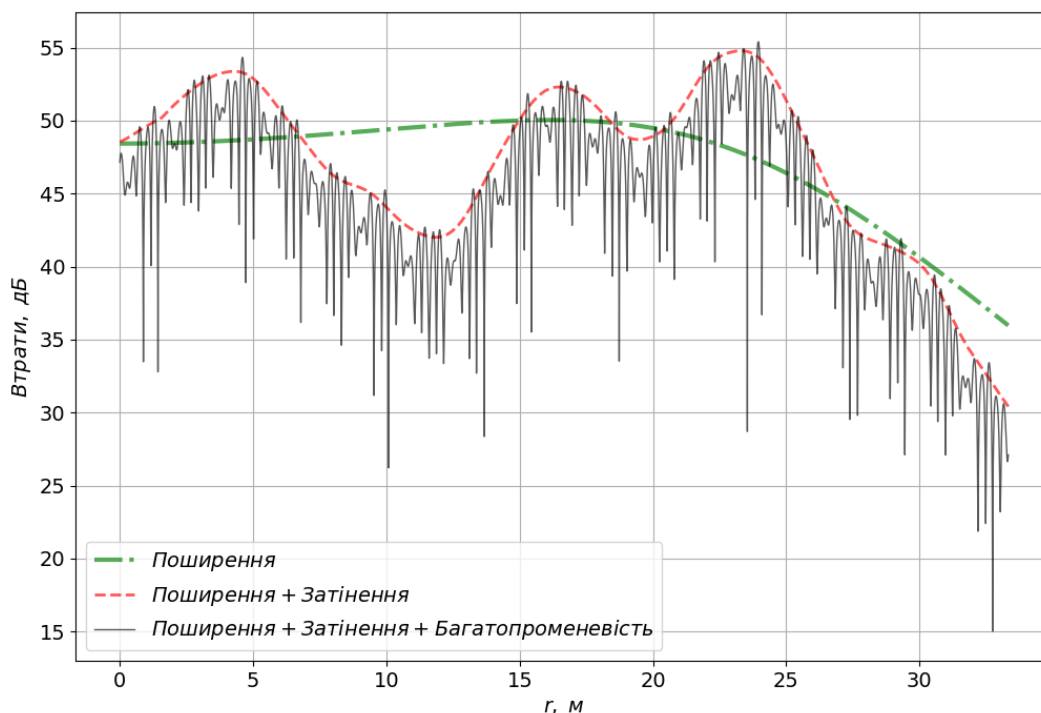


Рис. 3. Залежність втрат сигналу від відстані між ДРВ та БпЛА

Різкі високочастотні (швидкі) коливання рівня втрат сигналу є неінформативними для вирішення завдання локалізації ДРВ і їх необхідно згладити, щоб отримати криву втрат, яка описує вплив ефектів на поширення та затінення.

Виміряні значення рівня прийнятого сигналу будуть розрідженими з точки зору просторового переміщення БпЛА. Це пов'язано з тим, що частота надходження вимірів складає $1/T_0$, а періодичність надходження даних про рівень потужності в конкретному діапазоні частот з центральною частотою f_0 буде ще нижчою і становитиме $1/T_s$. Для отримання більш щільних даних необхідно зменшувати швидкість БпЛА. Проте при фіксованій тривалості його польоту це призведе до обльоту меншої ділянки простору і збору меншої кількості інформації про ДРВ.

Дані для різних частот f_0 необхідно обробляти окремо, оскільки характеристики середовища поширення радіохвиль змінюються при зміні частоти радіосигналу. Також на різних частотах працюють, як правило різні радіоелектронні засоби із різними потужностями випромінювання. Не врахування даного факту призведе до внесення додаткових похибок у оцінки рівня сигналу через усереднення вимірювань.

Оцінювання місцеположення ДРВ за рівнем прийнятого сигналу можна формалізувати до визначення параметрів складових 1 та 2 запропонованої моделі (10), а саме дальності та кореляційної відстані затінення в різні моменти часу та для різних частот. Значення коефіцієнта втрат на поширення радіохвиль ν є принциповим у випадку коли маршрут польоту БпЛА проходить через межу середовищ, для яких дане значення суттєво змінюється. В такому випадку буде спостерігатися зміна рівня прийнятого сигналу, що не пов'язана зі зміною

дальності та затіненням. Даний вплив є паразитним і слабо прогнозованим. Проте, маючи карту місцевості та знаючи маршрут польоту БпЛА, можна грубо оцінити межу середовищ. Паразитний вплив складової 3 усувається шляхом згладжування швидких пульсацій потужності прийнятого сигналу. Щодо складової 4, то її паразитний і невідомий вплив усунути неможливо, якщо відсутня інформація про форму ДС антени ДРВ та її орієнтацію у просторі.

Розділення складових, що змінюються з різними частотами в часі, можливе шляхом низькочастотної фільтрації для двох різних частот зрізу. Для фільтрації високочастотних складових, що пов'язані із завмираннями Релея, частота зрізу фільтра низьких частот (ФНЧ) визначається швидкістю польоту БпЛА v та несучою частотою сигналу f_0 . Якщо значення T_0 визначене виразом (15) то частоту зрізу ФНЧ необхідно обирати з умови

$$f_{LPF} \approx 2v f_0 / c. \quad (17)$$

Після фільтрації високочастотних складових необхідно прибрати тренд, пов'язаний із затіненням. Отримана в результаті крива відповідатиме залежності зміни відстані між ДРВ та БпЛА. Для фільтрації логарифмічно-нормальних завмирань параметри фільтра визначаються кореляційною відстанню затінення r_c . Частоту зрізу ФНЧ в такому випадку можна розрахувати за формулою

$$f_{LPF} \approx v / r_c. \quad (18)$$

Низькочастотну фільтрацію можна реалізувати шляхом згладжування даних вікном ковзаючого середнього.

Висновки

У результаті проведених досліджень отримано математичну модель, що описує потужність прийнятого сигналу в умовах впливу різномасштабних завмирань і враховує скануючий режим роботи засобу радіомоніторингу, його переміщення та невідому форму діаграми спрямованості антени ДРВ. Надано пропозиції щодо розділення складових затухання та завмирань із використанням низькочастотної фільтрації. Це дозволить оцінити місцеположення ДРВ у разі сумісного оброблення вимірних значень потужності прийнятого сигналу і траєкторії польоту БпЛА із засобом РМ. Перспективи подальших досліджень в даному напрямку полягають у розробленні методу локалізації ДРВ за результатами аналізу рівнів прийнятого сигналу, а також оптимізації маршруту польоту БпЛА з урахуванням апріорних даних щодо можливого положення ДРВ та карти місцевості. Також доцільно розробити математичні моделі прийнятого сигналу для випадку одночасного прольоту заданої області простору кількома БпЛА із засобами РМ.

Список літератури:

1. Gul N., Kim S. M., Ali J., Kim J. UAV aided virtual cooperative spectrum sensing for cognitive radio networks // PLoS One. 2023. Vol. 5. 36 p. doi: 10.1371/journal.pone.0291077.
2. Liu X., Guan M., Zhang X., Ding H. Spectrum Sensing Optimization in an UAV-Based Cognitive Radio // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 44002–44009. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2862424.
3. Yan L., Cai Y., Wei H. Unmanned aerial vehicle-assisted wideband cognitive radio network based on DDQN-SAC. EURASIP // Adv. Signal Process. 2024. Vol. 43. doi: 10.1186/s13634-024-01141-3
4. Abohashish S. M. M., Rizk R. Y., Elsedimy E. I. Trajectory optimization for UAV-assisted relay over 5G networks based on reinforcement learning framework // Wireless Com Network. 2023. 55. doi: 10.1186/s13638-023-02268-x
5. Min A. W., Shin K. G. Impact of Mobility on Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks // CoRoNet '09: Proceedings of the 2009 ACM workshop on Cognitive radio networks. P. 13–18. doi: 10.1145/1614235.1614239
6. Shang B. et al. 3D Spectrum Sharing for Hybrid D2D and UAV Networks // IEEE Transactions on Communications. 2020. Vol. 68. No. 9. P. 5375–5389. doi: 10.1109/TCOMM.2020.2997957
7. Shen F., Ding G., Wang Z., Wu Q. UAV-Based 3D Spectrum Sensing in Spectrum-Heterogeneous Networks // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. Vol. 68, No. 6. P. 5711–5722. doi: 10.1109/TVT.2019.2909167
8. Chen H.-C. et al. Collaborative compressive spectrum sensing in a UAV environment // MILCOM 2011 Military Communications Conference, Baltimore, MD, USA, 2011. P. 142–148. doi: 10.1109/MILCOM.2011.6127507.

9. Galkyn S., Ananiev V., Zadonskiy O., Kovshar V. Simulation Mathematical Modeling of the Electronic Environment for Evaluating of Radio Monitoring Systems Effectiveness // IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Kharkiv, Ukraine, 2020. P. 1099-1102. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252728.
10. Sova O. et al. Development of a method for assessment and forecasting of the radio electronic environment // EUREKA: Physics and Engineering. 2021. Vol. 4. P. 30–40. doi: 10.21303/2461-4262.2021.001940
11. Xu W., Wang S., Yan S., He J. An Efficient Wideband Spectrum Sensing Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle Communication Networks // IEEE Internet of Things Journal. 2019. Vol. 6, No. 2. P. 1768–1780. doi: 10.1109/JIOT.2018.2882532.
12. Jasim M. A. et al. A Survey on Spectrum Management for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 11443–11499. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3138048.
13. Clark L. et al. PropEM-L: Radio Propagation Environment Modeling and Learning for Communication-Aware Multi-Robot Exploration // Robotics: Science and Systems. 2022. 8 p. doi: 10.48550/arXiv.2205.01267
14. Jiang K. et al. Distributed UAV Swarm Augmented Wideband Spectrum Sensing Using Nyquist Folding Receiver // Electrical Engineering and Systems Science 2023. doi: 10.48550/arXiv.2308.07077
15. Phillips C., Ton M., Sicker D., Grunwald D. Practical radio environment mapping with geostatistics // IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks, Bellevue, WA, USA, 2012. P. 422–433. doi: 10.1109/DYSPAN.2012.6478166.
16. He D., Liang G., Portilla J., Riesgo T. A novel method for radio propagation simulation based on automatic 3D environment reconstruction // 6th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Prague. Czech Republic, 2012. P. 1445–1449. doi: 10.1109/EuCAP.2012.6206457.
17. Shen F. et al. 3D Compressed Spectrum Mapping With Sampling Locations Optimization in Spectrum-Heterogeneous Environment // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2022. Vol. 21, No. 1. P. 326–338. doi: 10.1109/TWC.2021.3095342
18. Shrestha R., Romero D., Chepuri S. P. Spectrum Surveying: Active Radio Map Estimation with Autonomous UAVs // Electrical Engineering and Systems Science. 2022. 14 p. doi: 10.48550/arXiv.2201.04125
19. Du X. et al. UAV-Assisted Three-Dimensional Spectrum Mapping Driven by Spectrum Data and Channel Model. Symmetry, 2021, Vol. 13(12). doi: 10.3390/sym13122308.
20. Lathi B. P., Ding Z. Modern digital and analog communication systems. 5th ed. Oxford University Press, 2019. 1025 p.
21. Ільченко М. Ю., Кравчук С. О. Телекомунікаційні системи : моногр. Київ : Наук. думка, 2017. 734 с.
22. Sklar B. Digital Communications // Fundamentals and Applications. 2nd ed. Prentice Hall, 2003. 953 p.
23. Recommendation ITU-R P.1406-2 (07/2015) Propagation effects relating to terrestrial land mobile and broadcasting services in the VHF and UHF bands P Series Radiowave propagation. 13 p.
24. Proakis J. G., Salehi M. Digital Communications. 5th ed. McGraw-Hill, 2008. 1170 p.
25. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles And Practice, 2/E. Pearson Education, 2010. 709 p.
26. Goldsmith A. Wireless communications. 2nd ed. Stanford University. 2020. 597 p.
27. Lu S., May J., Haines R. Efficient modeling of correlated shadow fading in dense wireless multi-hop networks. In Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014. P. 311–316. doi: 10.1109/WCNC.2014.6951986
28. Karagiannis G. A., Panagopoulos A. D. Dynamic Lognormal Shadowing Framework for the Performance Evaluation of Next Generation Cellular Systems // Future Internet, MDPI. 2019. Vol. 11(5). P. 1–18. doi:10.3390/fi11050106
29. Patzold M., Laue F. Statistical properties of Jakes' fading channel simulator // VTC '98. 48th IEEE Vehicular Technology Conference. Pathway to Global Wireless Revolution (Cat. No.98CH36151). Ottawa, ON, Canada, 1998. Vol.2. P. 712–718. doi: 10.1109/VETEC.1998.683675.

Надійшла до редколегії 03.11.2024

Відомості про автора:

Бугайов Микола Вікторович – канд. техн. наук, старший дослідник, Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, заступник начальника науково-дослідного відділу наукового центру, Україна; e-mail: karunen@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0899-9843>

PHYSICS OF DEVICES, ELEMENTS AND SYSTEMS ФІЗИКА ПРИЛАДІВ, ЕЛЕМЕНТІВ І СИСТЕМ

УДК 629.7.064.5

DOI:10.30837/rt.2024.4.219.10

*В.М. БОРЩОВ, д-р техн. наук, О.М. ЛІСТРАТЕНКО, канд. техн. наук,
М.А. ПРОЦЕНКО, канд. техн. наук, І.Т. ТИМЧУК, канд. техн. наук,
О.В. КРАВЧЕНКО, К.Г. БІЛОУСОВ, І.Т. ПЕРЕКОПСЬКИЙ*

НОВІ ПІДХОДИ ДО СТВОРЕННЯ НАДЛЕГКИХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ ДЛЯ НАДМАЛИХ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

Вступ

Останнім часом спостерігається значне зростання кількості запусків надмалих космічних апаратів (КА), маса яких не перевищує 10–30 кг. Сфера застосування таких КА також постійно розширюється і особливу роль у цьому напрямку відіграє стандарт CubeSat. Стандарт CubeSat дає змогу розробляти й створювати мініатюрні КА за короткий проміжок часу та за відносно невеликих витрат. При цьому зростають можливості й надійність компонентів для КА CubeSat, а також розвивається їх інфраструктура.

Для досягнення конкурентних переваг розробники й виробники сучасних надмалих КА прагнуть до покращення питомих енергомасових та ресурсних характеристик джерел енергії бортових систем, зокрема батарей сонячних (БС). При цьому постійно вирішуються основні завдання з удосконалення БС, а саме: підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів (ФП), зменшення маси, площі й вартості БС, підвищення їх радіаційної стійкості, ресурсу, а також розширення сфери їх застосування. Характеристики БС значною мірою визначають економічну та цільову ефективність КА CubeSat, тому особлива увага приділяється використанню в БС високоефективних ФП, які мають високі енергомасові показники та тривалий ресурс в умовах впливу руйнівних чинників космічного простору. При цьому енергомасові показники несучих панелей (каркасів) БС оптимізуються з метою забезпечення мінімізації масових характеристик БС. Конструкції БС і панелей БС розробляються з урахуванням максимально можливого використання напрацьованих технічних рішень та освоєних промисловістю матеріалів і комплектуючих. При цьому конструкції БС оптимізуються з урахуванням зручності монтажу груп ФП на панелях БС і їх підключення до електричних схем із застосуванням стандартних інструментів та оптимальних технологічних рішень для їх виготовлення [1, 2].

Мета роботи – розробка нових підходів для вибору конструктивно-технологічних рішень (КТР) полегшених високоефективних БС на основі надлегких жорстких вуглепластикових панелей, а також умовно гнучких надлегких сонячних модулів на гнучких алюміній-поліімідних (Al-Pi) платах із застосуванням радіаційно-стійких тонких (80–110 мкм) багато-перехідних арсенід-галієвих (GaAs) ФП із коефіцієнтом корисної дії (ККД) 30–32 % для КА CubeSat з покращеними питомими енергомасовими характеристиками.

1. Надлегкі БС для КА CubeSat

1.1. Жорсткі надлегкі панелі для БС

Під час розробки нових, більш досконалих конструкцій БС основними факторами, що впливають на їх енерговіддачу з одиниці площі, є параметри застосовуваних ФП, а на енерговіддачу з одиниці маси – конструкція та матеріали панелі БС.

В якості жорстких панелей для БС КА CubeSat на теперешній час найчастіше застосовуються жорсткі вуглесотопластові та алюмінієві панелі, а також панелі на основі фольгованих склотекстолітів. Наприклад, голландська компанія Innovative Solutions in Space (ISIS), яка спеціалізується на технологіях для малих КА масою від 1 до 30 кг, у своїх БС переважно

використовує алюмінієві та вуглесотопластові панелі [3]. Британська компанія Clyde Space Ltd застосовує для панелей БС високоякісний фольгований склотекстоліт FR4 з поліімідним покриттям [4]. Використання матеріалу FR4 для виготовлення панелей БС для КА CubeSat-3U практично забезпечило створення відносно легких БС із потужністю близько 7 Вт і масою від 135 до 190 г при загальній масі КА не більше 4 кг [5, 6]. В Україні у 2019 р. ДП «КБ «Південне» у рамках роботи з реалізації програми розвитку супутникових технологій також була проведена розробка надмалого КА «GS-1» класу CubeSat-3U. Штатні зразки БС для цього апарату з потужністю близько 7,25 Вт були виготовлені компанією ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ». Панелі для БС виготовлялися з вітчизняного фольгованого міддю (35 мкм) склотекстоліту СТЕФ-1 із загальною товщиною 1,5 мм і питомою щільністю близько 1,9 г/см³. Розміри БС становили 327 × 82 мм при загальній масі близько 110 г (маса панелі ~80 г), питомій потужності по площі близько 280 Вт/м² та питомій потужності по масі близько 66 Вт/кг на кінець терміну активного існування (ТАІ). У БС застосовувалися високоефективні фотоелектричні комірки 3G30A компанії Azur Space Solar Power із ККД 30 % [7].

Водночас для підвищення енерговіддачі з одиниці маси БС для КА CubeSat сучасні розробники також застосовують надтонкі панелі з титану та алюмінієвих сплавів. Питома щільність алюмінію (2,7 г/см³) вдвічі менша, ніж у титану (4,5 г/см³), проте титан має більшу міцність порівняно з алюмінієм. Тому компанія ISIS розробила й виготовила високоефективні БС для КА CubeSat серії EXA DSA, у яких використовується титанова панель для механізму розгортання і яка забезпечує при товщині 0,25 мм міцну конструкцію БС при суттєвому зменшенні її маси. Таким чином, маса панелі з титану товщиною 250 мкм для БС КА CubeSat-1U не перевищила 8 г, а маса панелі для БС КА CubeSat-3U – не більше 25 г [8].

Для подальшого збільшення енерговіддачі з одиниці маси у більш досконалих БС для надмалих КА оптимальним рішенням є застосування у БС тонких і ультралегких вуглепластикових панелей із питомою щільністю близько 1,5–2,0 г/см³. При цьому тонкі багат шарові вуглепластикові панелі товщиною, наприклад, близько 0,5 мм з високомодульних, високоміцних і відносно недорогих вуглецевих волокон, у порівнянні з титановими панелями, не поступаючись їм у міцності, забезпечують майже в три рази меншу питому щільність. У свою чергу вуглепластик, незважаючи на майже рівну питому щільність, має удвічі більшу питому міцність і майже вчетверо вищу жорсткість порівняно зі склопластиками. Встановлення БС з надлегкими вуглепластиковими панелями на жорсткі та міцні шасі-каркаси з алюмінієвих сплавів у КА CubeSat дозволяє суттєво підвищити їх енерговіддачу з одиниці маси. Особливо з використанням в БС сучасних новітніх комірок ФП на основі тонких (80–110 мкм) багатоперехідних GaAs ФП із ККД 30–32 % [8, 9].

1.2. ФП та комірки ФП для БС

Багато світових космічних держав на сьогодні освоїли промислове виробництво високоефективних триперехідних фотоелектричних перетворювачів із ККД близько 30 %. Однак лише три провідні компанії у світі раніше за усіх пройшли повноцінну космічну кваліфікацію триперехідних ФП та захищених фотоелектричних комірок ФП із ККД 30 %, які серійно випускаються і мають польотну історію понад 20 років. Це такі компанії, як Emcore, з 2014 р. – SolAero Technologies Corp. (США), Spectrolab (США), а також Azur Space Solar Power (Хайльбронн, Німеччина). Усі ці компанії пройшли однаковий шлях у розробці ФП, хоча й у різний час; і всі три компанії на фінальному етапі досягли серійного виробництва високоефективних ФП космічної кваліфікації з ККД до 30 %. При цьому найкращий у світі результат продемонструвала німецька компанія Azur Space, чії триперехідні ФП 3G30-Advanced досягли значення ККД близько 29,7 %. Наразі Azur Space продовжує впевнено утримувати світове лідерство та успішно освоїла серійну технологію виробництва ФП із ККД 31–32 %.

З точки зору спрощення та зменшення трудомісткості процесів складання БС, останнім часом надається перевага ФП великої площі, які мають у своїй структурі або інтегровані (монолітні) захисні діоди, або ФП із зовнішніми захисними діодами. Основна перевага ФП із зовнішніми або інтегрованими захисними діодами – це можливість спростити технологію складання ФП у групи та секції БС. Під час складання БС основною складальною одиницею стає так звана комірка ФП, яка являє собою або ФП з інтегрованим захисним діодом, до якого приварені виводи (міжелементні з'єднання) та приклеєне захисне скло, або ФП із встановленим зовнішнім захисним діодом, до якого приварені виводи та приклеєне захисне скло (СІС – coverglass-interconnectors-cell). Такий підхід дозволяє суттєво зменшити трудомісткість складальних операцій (до 50 %) під час виготовлення БС.

Наприклад, гетероструктурні комірки ФП 3G30A із зовнішнім захисним діодом великої площі були розроблені компанією Azur Space і призначалися для надійної експлуатації КА на геостаціонарних орбітах Землі до значень поглиненої дози (флюенсу) 1×10^{15} е/см² на кінець ТАІ тривалістю до 15 років. На сьогодні саме ФП 3G30 і комірки ФП 3G30A компанії Azur Space обирають багато виробників низькоорбітальних супутників у всьому світі. Це пов'язано з тим, що ФП 3G30 і комірки 3G30A успішно пройшли повний обсяг кваліфікаційних випробувань на відповідність стандарту ESA ECSS-E-ST-20-08C. Комірки ФП компанії Azur Space у складі БС на широко використовуваних жорстких вуглесотопластових каркасах мають успішну та тривалу історію застосування на всіх орбітах функціонування КА починаючи з 1996 р. для високоефективних одно- і двоперехідних арсенід-галієвих ФП та з 2002 р. – для триперехідних ФП [10].

Також у 2012–2013 рр. на німецькому технологічному КА ТЕТ-1 в складі експериментальної БС були проведені та успішно пройшли льотні кваліфікаційні випробування більш тонкі триперехідні GaAs ФП компанії Azur Space. Кваліфікаційні випробування проходили на круговій сонячно-синхронній орбіті на висоті 506 км. Експериментальна БС представляла собою вуглепластикову панель з розміщеними на ній інноваційними комірками ФП розмірами 40×80 мм та комірками ФП розмірами 20×20 мм. Комірки ФП мали зовнішні захисні діоди та скляні захисні покриття CMX100 компанії Qiortiq (Велика Британія). При цьому ФП для комірок з розмірами 40×80 мм мали різні товщини від 150 до 20 мкм. Експериментальні комірки з меншими товщинами ФП показали кращі результати ефективності протягом усього часу польоту супутника, які навіть перевищували результати наземних лабораторних випробувань. За результатами льотної кваліфікації в компанії Azur Space у 2017 р. було розпочато серійне виробництво нових вдосконалених більш тонких ФП 3G30С з товщиною 80 мкм і комірок ФП на їх основі. Ця розробка забезпечила зниження маси одного ФП 3G30 з 2,75 до 1,5 г (більше 40 %), що дозволило також значно зменшити масу фотогенеруючої частини та збільшити енерговіддачу з одиниці маси розроблюваних перспективних БС [8, 11].

Таким чином, сучасні високоефективні комірки ФП великої площі з зовнішнім захисним діодом, з тонкими багатоперехідними ФП розмірами 40 x 80 мм та ККД 30–32 % компанії Azur Space є найкращим і широко застосованим варіантом у розроблених БС останніх поколінь для КА CubeSat з метою покращення їхніх питомих енергомасових характеристик.

1.3. Умовно гнучкі сонячні модулі

Застосування умовно гнучких сонячних модулів з покращеними енергомасовими та ресурсними характеристиками на основі високоефективних тонких багатоперехідних GaAs ФП з ККД 30–32 % та гнучких носіїв також дозволяє розробити та виготовити значно полегшені БС для сучасних надмалих КА з покращеними питомими енергомасовими характеристиками.

До складу умовно гнучких сонячних модулів з різними геометричними розмірами входять гнучкі безадгезивні носії, що забезпечує простоту їх виготовлення та дозволяє автоматизувати процеси електричного з'єднання ФП у модулях. З'єднання ФП у модулях як послідовно, так і паралельно здійснюється за допомогою плоских (стрічкових) алюмінієвих

выводів (міжз'єднань) як зварюванням розщепленим електродом, так і точковим ультразвуковим зварюванням. Якщо у модулі застосовані ФП з інтегрованими захисними діодами, то до ФП в модулях приклеюються лише захисні скляні покриття. У разі, якщо в модулі застосовані незахищені ФП, то до кожного ФП приспонується зовнішній захисний діод, а потім приклеюється захисне скло до фронтальної поверхні ФП за допомогою оптично прозорих адгезивних матеріалів. На гнучкому носії (гнучкій друкованій платі) на Al провідниках формуються локальні багатошарові Ni-SnBi контакти для забезпечення послідовного та паралельного з'єднання сонячних модулів у БС методом паяння.

Застосування умовно гнучких сонячних модулів у конструкції розроблюваних БС дозволяє забезпечити підвищення їх стійкості до впливу механічних навантажень, зменшити деформації, що виникають через циклічні зміни температури, та покращити теплові режими експлуатації ФП. При цьому спрощується процес позиціонування ФП в модулях, мінімізуються зазори між ФП для підвищення заповнення БС. Такий технічний результат досягається за рахунок застосування для комутації ФП гнучкої друкованої плати, виготовленої з Al-Pi лакофольгованого безадгезивного діелектрика власного виробництва компанії ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ». Наприклад, фольгованого поліімідного діелектрика марки ЛТУ-ФПА30-20 (Al – 30 мкм, Pi – 20 мкм) або ЛТУ-ФПА15-10 (Al-15 мкм, Pi – 10 мкм) з питомою щільністю шаруватих матеріалів порядку 2,0 – 2,1 г/см³. Система Al-Pi забезпечує підвищену стійкість БС до впливу механічних навантажень і зменшення деформацій, що виникають через циклічні зміни температури, завдяки високій еластичності та механічній міцності при вигині та інших механічних впливах. В електричних ланцюгах ФП повністю виключаються короткі замикання, оскільки всі комутуючі провідні елементи плати ізолювані один від одного поліімідом. Ізолювання поліімідом поверхні плоских алюмінієвих гнучких виводів-компенсаторів для послідовного з'єднання ФП і зазорів між ФП в модулях призводить до багаторазового збільшення повного опору протікання струмів витoku, що значно знижує ймовірність короткого замикання в електричних ланцюгах. Всі міжелементні з'єднання здійснюються за допомогою алюмінієвої фольги. Цей матеріал має фізико-хімічні властивості, які перешкоджають корозії. Окисна плівка на алюмінії надійно захищає алюмінієві шари від подальшого окислення при впливі атомарного кисню в верхніх шарах атмосфери та в космічному просторі. Застосування для захисту поверхні алюмінію бар'єрних антикорозійних шарів з нікелю в зонах зварювання в контактних парах Ag-Ni, а також Au-Ni корозія не виникає навіть при дуже жорстких умовах експлуатації сонячних модулів. Це дозволяє здійснювати міцні зварні з'єднання типу Al-Ni-Ag алюмінієвих плоских виводів з токопровідними шинами в БС, покритими сріблом, або здійснювати надійні з'єднання типу Al-Ni-Ag з срібними контактами ФП, а також з'єднання типу Al-Ni-Au алюмінієвих плоских виводів з срібними контактами ФП із золотими покриттями за допомогою ультразвукового зварювання [12, 13].

Високоєфективні триперехідні GaAs ФП у БС потребують надійного індивідуального захисту від впливу зворотної напруги на ФП у нештатних ситуаціях. Використання зовнішнього захисного (байпасного) діода є одним із найбільш поширених способів захисту ФП від зворотної напруги. Однак цей спосіб має технічні та виробничі проблеми, які іноді роблять таке рішення незручним і не вигідним. Зокрема, коли для виготовлення БС використовуються триперехідні ФП малої площі в великій кількості, застосування зовнішніх байпасних діодів суттєво збільшує вартість складання та зменшує розміри фотогенеруючої області БС. Наприклад, для захисту від зворотної напруги в малорозмірних триперехідних ФП марки SCTJ25 % компанією CESI було розроблено та запатентовано інноваційне технічне рішення [14]. Основна ідея нового методу захисту полягала у створенні в ФП інтегрованого монолітного захисного пристрою включення/вимкнення, який активується, коли ФП переходить у стан зворотної зміщення. У цьому випадку немає необхідності в обрізанні ФП в кутку для установки зовнішнього захисного діода. Струмопровідний захисний пристрій розміщується безпосередньо в ФП і, отже, не потрібно застосовувати додаткове міжз'єднання, як у випадку використання зовнішнього байпасного діода. Це знижує вартість складання та дозволяє збільшити ступінь заповнення БС. Інноваційні ФП SCTJ25 % у 2013 р. успішно пройшли кваліфікаційні

льотні випробування в складі БС демонстраційного мікросупутника TechDemoSat-1 (TDS-1) компанії Surrey Satellite Technology Ltd (SSTL), світового лідера у виробництві малих супутників.

На рис. 1 представлений діючий тестовий технологічний зразок умовно гнучкого Al-Pi сонячного модуля, виготовлений фахівцями ТОВ «НВП «ЛІТУ» на одноперехідних GaAs ФП марки SJ компанії ENE (Бельгія). Одноперехідні ФП SJ зі структурою GaAs/Ge мають розміри 40 x 20 мм, товщину 160 мкм, ККД 18 %. Фронтальні та тильні контакти ФП виготовлені з напиленого срібла, покритого золотом. Маса одного ФП не перевищує 1 г.

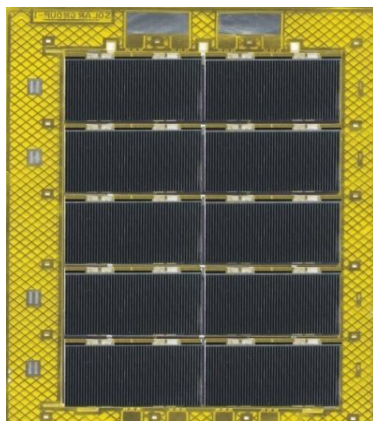


Рис. 1. Тестовий технологічний зразок умовно гнучкого, ультралегкого сонячного модуля з GaAs ФП без захисних стекол та без захисних діодів

Тестовий технологічний зразок умовно гнучкого, ультралегкого сонячного модуля складається з 10 ФП. В якості гнучкого носія використано фольгований поліімідний діелектрик ФДІ-А-50. ФП розміщуються в вікнах поліімідного шару тильною стороною до алюмінію, що дозволяє забезпечити простоту позиціонування ФП на носії та їх електричну ізоляцію. Гнучкі Al-Pi міжелементні з'єднання виконуються у вигляді петель з метою зменшення деформацій у модулі під час термоциклювання в умовах космічного польоту та забезпечення його тривалого терміну існування (рис. 2).

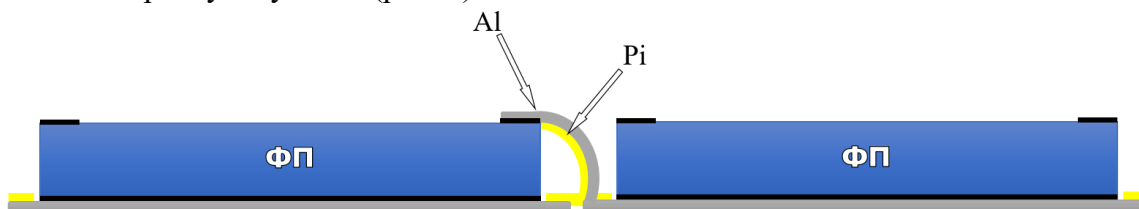


Рис. 2. Схематичне зображення з'єднання гнучкого плоского Al виводу з контактами ФП

З'єднання контактів ФП з Al виводами гнучкого носія здійснювалося ультразвуковим зварюванням електродами діаметром 100 мкм. Міцність зварних з'єднань на відрив, як для тильних, так і для фронтальних контактів ФП, складає 15 – 30 г (більше 200 кг/см²), що забезпечує високу надійність зварних з'єднань. Коефіцієнт заповнення тестового технологічного зразка сонячного модуля складає не менше 0,95.

2. КТР БС з покращеними питомими енергомасовими характеристиками для КА CubeSat-3U

2.1. КТР надлегких углепластикових панелей БС

Відомо, що ефективність розроблених конструкцій для космічної техніки значною мірою залежить від міцнісних та фізико-механічних характеристик усіх її елементів та їх стабільності, що забезпечується технологією виробництва [15]. Одним з основних конструкційних матеріалів для нових або модернізованих панелей БС космічного призначення

на сьогодні є високоміцні та високомодульні полімерні композиційні матеріали з супертонкими моношарами на основі вуглецевих волокон. У роботі [16] наведено результати експериментальних досліджень та виготовлення компанією ТОВ «Карболайн» (м. Харків, Україна) багатошарової вуглепластикової основи експериментальної панелі БС з препрегів з використанням вуглецевого волокна марки IMS 65 (Японія). Для отримання моношару товщиною 20 мкм односпрямований джгут з вуглецевого волокна лінійної щільності на спеціально виготовленому обладнанні розкочували, а після розкочування проводили просочення вуглеволокна епоксидним зв'язуючим ЕДТ-10П. Далі просочені моношари укладалися в пакети у прес-форму за заданою схемою армування. Виготовлення вуглепластикових основ здійснювалося вакуумно-автоклавним способом у плоскому автоклаві. При товщині багатошарової основи 0,3 мм її висока міцність і мінімізація прогину забезпечувалися за рахунок схеми армування $[90^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$. Маса виготовленого зразку вуглепластикової основи з розмірами 420 x 430 мм (0,18 м²) склала 16,32 г, а питома маса по площі – 90,6 г/м². Прогин експериментальної надлегкої вуглепластикової основи в робочому положенні БС не перевищував 23 мкм при встановленні на неї багатоперехідних GaAs ФП.

На світовому ринку на теперішній час у вільному продажі з'явилася значна кількість різних нових типів серійно виготовлюваних міцних і легких пластин із вуглепластику. Наприклад, плоскі тонкі вуглепластики розмірами 500 x 500 мм і товщиною від 0,2 до 1 мм та більше компанії Sunlike (Китай), які виготовляються за технологією 3K Twill із питомою щільністю близько 1,5 г/см³. Такі вуглепластики призначені для виготовлення полегшених конструкцій різних типів для літальних апаратів, зокрема деталей для дронів. Вони також можуть бути використані як вуглепластикові основи панелей БС для КА класу CubeSat, що дозволяє суттєво покращити їхні питомі енергомасові характеристики. При цьому вартість таких вуглепластиків є відносно невисокою і становить близько 150 Євро/кг.

Під час створення вдосконалених панелей БС на вуглепластикових надлегких основах для КА класу CubeSat-3U в компанії ТОВ «НВП «ЛТУ» були запропоновані наступні КТР, які забезпечують високі міцнісні та фізико-механічні характеристики розроблюваних полегшених панелей БС для малих КА:

1) Надлегка панель БС являє собою плоску конструкцію розміром 327 x 82 мм (0,027 м²). Основа панелі складається з багатошарового вуглепластику з питомою густиною близько 1,5 г/см³ за схемою армування $[90^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$. Товщина вуглепластикової основи становить не більше 0,5 мм, а маса – близько 20 г;

2) На фронтальну поверхню вуглепластикової основи за допомогою RTV-силікону полідиметилфенілсилоксанового типу марки RTV-S691 компанії Wacker Chemie AG (Німеччина) приклеюється електрично ізолююча поліімідна плівка марки DuPont™ Kapton® HN товщиною близько 50 мкм. При цьому шар клеєвого з'єднання вуглепластикової основи з діелектричною ПП плівкою має товщину близько 25 мкм.

Таким чином, КТР та обрані матеріали для вдосконалених жорстких надлегких вуглепластикових панелей БС для КА CubeSat – 3U мають забезпечити сумарну товщину панелі БС не більше 0,6 мм при загальній масі не більше 23 г та питомій масі за площею близько 852 г/м².

2.2. КТР надлегких сонячних модулів на гнучких Al-Pi носіях

Сучасні конструктори КА та літальних апаратів із використанням БС надають перевагу багатоперехідним ФП, виготовленим із декількох шарів світлопоглинальних гетероструктурних матеріалів, які ефективно перетворюють ділянки сонячного спектра з певними довжинами хвиль в енергію, використовуючи ширший спектр сонячного випромінювання. В аерокосмічній промисловості зазвичай застосовуються триперехідні ФП через їх високе співвідношення ефективності до вартості порівняно з іншими типами ФП. На рис. 3 наведено доступні наразі технології виготовлення серійних ФП із різними значеннями енергоефективності від провідних світових виробників.

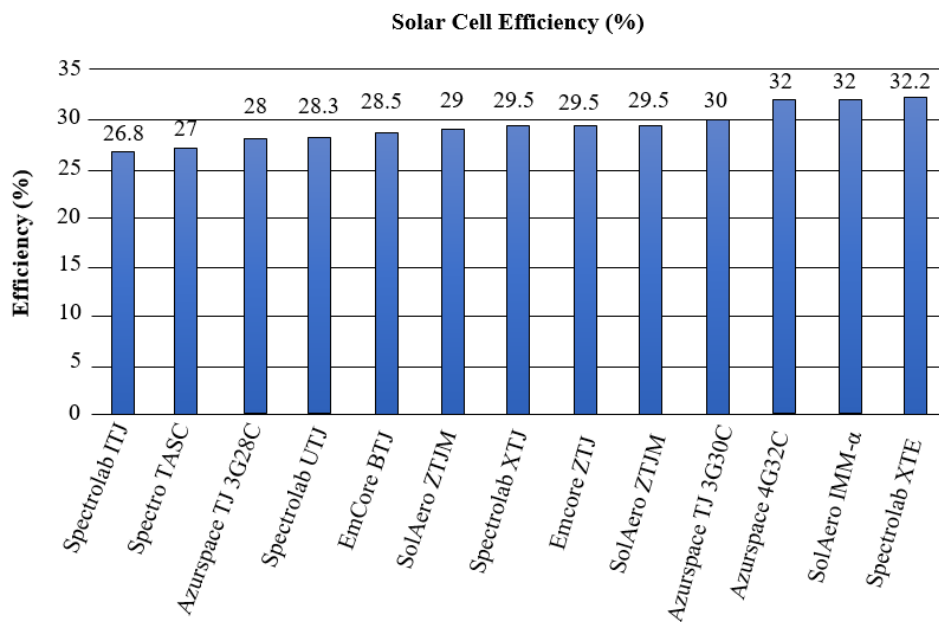


Рис.3. Ефективність серійних ФП провідних світових виробників [8]

З графіку на рис. 3 випливає, що у теперішній час компанія Azur Space Solar Power пропонує на світовому ринку різноманітні серійні багатоперехідні ФП великих розмірів з ефективністю від 28 до 32 %. Ці ФП виготовляються з наногетероструктурних матеріалів III і V груп періодичної таблиці з різними варіантами розмірів. Такі ФП з розміром 40 x 80 мм найчастіше застосовуються в малих КА та БС для інших застосувань. Найбільш ефективні чотириперехідні ФП 4G32C мають ККД близько 32 % при розмірах 40 x 80 мм ± 0,1 мм, із підвищеною робочою напругою до 3,0 В [8]. Проте багато виробників низькоорбітальних КА у всьому світі надають перевагу триперехідним ФП 3G30C з ККД 30 % та зібраним на їх основі коміркам ФП 3G30A із зовнішнім захисним діодом, виробництва компанії Azur Space. Це зумовлено тим, що ФП 3G30C і захищені фотоелектричні комірки 3G30A повністю пройшли кваліфікаційні випробування на відповідність стандарту ESA ECSS-E-CT-20-08C. Комірки ФП компанії Azur Space у складі БС на широко використовуваних жорстких вуглестових каркасах мають успішну та тривалу льотну історію для застосування на всіх орбітах функціонування КА. Починаючи з 1996 р. вони використовуються для високоефективних одно- та двоперехідних GaAs ФП, а з 2002 р. – для триперехідних ФП [17]. Також, за результатами успішної льотної кваліфікації, компанія Azur Space з 2017 р. розпочала серійне виробництво нових вдосконалених тонких ФП 3G30C з товщиною 80 мкм та комірок ФП на їх основі. Ця розробка дозволила знизити масу одного ФП 3G30C з 2,75 до 1,5 г (більше ніж на 40 %), що суттєво зменшує масу фотогенеруючої частини та збільшує енерговіддачу з одиниці маси перспективних БС [18].

Протягом останніх 10 років компанія ТОВ «НВП «ЛТУ» здобула успішний досвід співпраці з компанією Azur Space у виготовленні БС як для малих, так і для надмалих КА, розроблених ДП «КБ «Південне». Тому при виборі нових підходів для розробки умовно гнучких ультралегких сонячних модулів на основі Al-Pi гнучких друкованих плат було надано перевагу високоефективним ФП компанії Azur Space. Зокрема, було обрано триперехідні ФП 3G30C-advanced із ККД 30 % з інтегрованим захисним діодом, а також триперехідні тонкі ФП 3G30C-advanced товщиною 80 мкм із ККД 30 % і чотириперехідні ФП товщиною 110 мкм 4G32C із ККД 32 %.

У табл. 1 наведено основні характеристики ФП 3G30C advanced товщиною 80 мкм, тонких ФП 4G32C, а також ФП 3G30C advanced з інтегрованими захисними діодами компанії Azur Space.

Основні характеристики ФП за умов АМ0, $T=28\pm 2^\circ\text{C}$ на початок ТАІ

Тип ФП	ФП 3G30C Advanced з інтегрованим захисним діодом	ФП 3G30C Advanced, 80 мкм	ФП 4G32C
Розміри, мм	40 x 80		
Площа фотогенеруючої області, см^2	30,18		
Напруга холостого ходу, В, не менше	2,7	2,69	3,45
Струм короткого замикання, А, не менше	0,520	0,520	0,457
Середній ККД, %, не менше	29,5	30	32
Напруга в точці максимальної потужності, В	2,41	2,41	3,0
Струм в точці максимальної потужності, А, не менше	0,504	0,502	0,433
Максимальна потужність, Вт	1,20	1,20	1,3
Коефіцієнт форми ВАХ (FF)	0,86	0,86	0,86
$dU_{\text{опт}}/dT$, мВ/ $^\circ\text{C}$ (флюєнс $5 \cdot 10^{14}$ е/см 2)	-7,2	-6,3	-8,8
$dI_{\text{опт}}/dT$, мА/ $^\circ\text{C}$ (флюєнс $5 \cdot 10^{14}$ е/см 2)	0,24	0,24	0,14
Питома маса ФП по площі, мг/см 2	≤ 86	≤ 50	≤ 56
Товщина ФП (без контактів), мкм	150	80	110
Маса ФП, г	2,75	1,5	$\leq 1,78$
Питома потужність по площі ФП, Вт/м 2	$\sim 400,0$	$\sim 400,0$	$\sim 433,0$
Питома потужність по масі ФП, Вт/кг	$\sim 436,0$	$\sim 800,0$	$\sim 730,0$

Параметри інтегрованого захисного діода ($T = 250^\circ\text{C} \pm 30^\circ\text{C}$):

- $U_{\text{пр}} (620\text{мА}) < 2,5 \text{ В}$;
- $I_{\text{зворот}} (2,8\text{В}) < 100 \text{ мкА}$;
- $I_{\text{прямий}} \text{ максимальний не менше } 2 \text{ А}$.

З розглянутих у табл. 1 характеристик ФП випливає, що за електричними параметрами найкращим є чотирикаскадний ФП 4G32C, який демонструє найвищі значення напруги холостого ходу і, відповідно, збільшення потужності та ККД на початок ТАІ. Крім того, при робочих температурах до плюс 65°C , які характерні для ряду КА класу CubeSat, потрібна менша кількість ФП у послідовному ланцюгу для необхідної робочої напруги БС, що сприяє підвищенню її надійності та технологічності виготовлення. Однак відсутність більш детальної офіційної інформації про результати використання ФП 4G32C у низькоорбітальних БС дозволяє розглядати їх застосування у теперішній час лише як перспективне. При виборі КТР для умовно гнучких надлегких сонячних модулів найкращі розрахункові оціночні значення питомої потужності за масою ~ 800 Вт/кг на початок ТАІ підтвердили найбільш ефективні триперехідні тонкі ФП марки 3G30C – advanced товщиною 80 мкм.

Таким чином, при розробці вдосконалених умовно гнучких ультралегких сонячних модулів на гнучких Al-Pi платах були обрані наступні КТР, що забезпечують їх високі міцнісні та фізико-механічні характеристики при суттєво покращених енергомасових показниках. Зокрема, запропоновані нові рішення для формування гнучкої Al-Pi комутаційної друкованої плати, встановлення та з'єднання ФП в електричну схему на гнучкій платі за допомогою УЗ зварювання, герметизації зварних з'єднань, а також приклеювання захисних скляних пластин на фронтальні поверхні ФП.

Гнучка комутаційна друкована плата для умовно гнучких надлегких сонячних модулів виготовляється методом фотолітографії з Al-Pi лакофольгового діелектрика власного вироб-

ництва компанії ТОВ «НВП «ЛТУ» марки ЛТУ-ФПА15-10. Al-Pi плата має розміри 327 x 82 мм з загальною товщиною не більше 25 мкм (товщина Al – 15 мкм, товщина Pi – 10 мкм) та масою не більше 1,4 г. У шарі алюмінію формуються гнучкі плоскі виводи для послідовного з'єднання ФП в модулі, в яких формуються області зварювання для електричного з'єднання гнучкої друкованої плати з тильними та фронтальними контактами ФП, виконаними з срібла, яке вкрито золотом (товщина срібла – 5 мкм, товщина золота – 180 нм). Далі в шарі алюмінію формуються перфораційні вікна з розміром (4x5) мм з кроком розміщення 10 мм та контактні площини для послідовного та паралельного з'єднання модулів у сонячній батареї. У шарі полііміда формуються посадочні вікна для позиціонування ФП, вікна для формування петель термомеханічних компенсаторів та вікна для зварювання з фронтальними контактами ФП. У зонах зварювання на шар алюмінію наноситься додатковий шар нікелю товщиною 2–4 мкм для створення стійкого до корозії з'єднання гнучкої друкованої плати з ФП. Обрана товщина покриття нікелю забезпечує максимальну міцність з'єднання при ультразвуковому зварюванні (діаметр електрода 170 мкм, ширина алюмінієвого плоского виводу в зоні зварювання 150 мкм). На контактні площинки в шарі алюмінію для з'єднання модулів між собою в БС методом пайки наноситься покриття Ni-SnBi товщиною близько 25 мкм.

На гнучку комутаційну плату встановлюються тонкі ФП 3G30C – Advanced (80 мкм) з ККД 30 %. Група з семи послідовно включених тонких ФП розмірами 40 x 80 мм між собою об'єднується в електричну схему типу 7S1P за допомогою Al міжз'єднань і токопровідних шин у гнучкій комутаційній платі шляхом ультразвукового зварювання. Для цього на ФП, які розташовані в технологічній оснастці тильною стороною вгору, укладається і позиціонується гнучка друкована плата так, щоб ФП збіглися з посадковими вікнами в шарі полііміду. Ультразвуковим зварюванням електродом діаметром 170 мкм здійснюється з'єднання областей зварювання на платі з тильними контактами ФП. Гнучка друкована плата з ФП перевертається фронтальною стороною ФП вгору. Гнучкі комутуючі виводи для послідовного з'єднання ФП у модулі формуються по вікнах в шарі полііміду та позиціонуються над фронтальними контактами ФП з одночасним формуванням петель термокомпенсаторів і зварюванням їх через вікна в полііміді.

На фотогенеруючу поверхню ФП оптично прозорим клеєм приклеюються захисні скляні пластини. Захисні скляні пластини виготовлені зі скла марки CMX товщиною 100 мкм і розмірами 40 x 80 мм компанії Qiortiq Space Technology (Велика Британія). Питома щільність скла становить 2,6 г/см³, коефіцієнт теплового лінійного розширення (КТЛР) – $6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Маса одного скла не перевищує 0,83 г. Захисне скло приклеюється прозорим силіконовим адгезивним матеріалом марки RTV-S690 компанії Wacker Chemie AG (Німеччина). Питома щільність клею – 1,06 г/см³. Розміри клеєвого шару: площа – 30 см², товщина – не менше 30 мкм. Маса клеєвого шару для приклеювання одного скла складає близько 0,09 г.

Кремнієві захисні діоди трикутної форми типу S By-pass diode компанії AZUR SPACE Solar Power встановлюються на гнучку комутаційну плату сонячного модуля за допомогою ультразвукового зварювання (діаметр електрода 170 мкм, ширина алюмінієвих плоских виводів у зоні зварювання 150 мкм). Високоєфективні кремнієві діоди призначені для захисту триперехідних GaAs ФП марки 3G30C – Advanced (80 мкм). Площа діода складає 1,19 см²; маса – менше 0,03 г; товщина – 130 ± 30 мкм; товщина срібних контактів – 3 – 11 мкм.

У табл. 2 представлені оціночні розрахункові значення основних фізико-технічних та питомих електроенергетичних характеристик різних варіантів умовно гнучких ультралегких сонячних модулів на гнучких алюміній-поліімідних платах.

Оціночні значення основних фізико-технічних та питомих електроенергетичних характеристик умовно гнучких сонячних модулів

Тип модуля	Характеристики					
	Розміри, мм x мм	Товщина, мкм	Маса, г	Питома енерговіддача на початок ТАІ для АМ0, T=25°C		
				По площі модуля, Вт/м ²	По масі модуля, Вт/кг	
1. Умовно гнучкий сонячний модуль на ФП (7 шт) великої площі з ФП 3G30C – Advanced з інтегрованим захисним діодом с ККД 30 %.	327 × 82	305	27,1	~ 336	~ 309	
	40 x 80	~ 150	~ 2,75			
	40 x 80	~ 100	~ 0,83			
	40 x 80	30,0	0,09			
1.1. Захисне скло марки Qiortiq CMX (7 шт).	40 x 80	~ 100	~ 0,83			
1.2. Адгезивний шар з прозорого силікону марки RTV-S690 (7 шт).	40 x 80	30,0	0,09			
1.3. Гнучка основа модуля з теплопровідного фольгованого поліімідного діелектрика марки ЛТУ-ТФПА15-10 (Al-15 мкм, Pi – 10 мкм) з теплопровідністю від 0,8 до 2,0 Вт/м•К.	327 × 82	25,0	1,4			
2. Умовно гнучкий сонячний модуль на комірках ФП (7 шт) великої площі з тонкими ФП 3G30C – Advanced, 80 мкм з ККД 30 %.	327 × 82	235	18,55	336	453	
	40 x 80	80,0	~ 1,5			
	2.1. Захисне скло марки Qiortiq CMX (7 шт).	40 x 80	100			~ 0,83
	2.2. Адгезивний шар з прозорого силікону марки RTV-S690 (7 шт).	40 x 80	30			0,09
	2.3. Кремнієвий зовнішній захисний діод типу S By-pass diode компанії Azur space (7 шт).	10,9x10,9	30,0			0,03
	2.4. Гнучка основа модуля з теплопровідного фольгованого поліімідного діелектрика марки ЛТУ-ТФПА15-10 (Al-15 мкм, Pi – 10 мкм) з теплопровідністю від 0,8 до 2,0 Вт/м К.	327 × 82	25,0			1,4
3. Умовно гнучкий сонячний модуль на комірках ФП (7 шт) великої площі з тонкими ФП 4G32C з ККД 32 %.	327 × 82	265	20,51	364	444	
	40 x 80	110	1,78			
	3.1. Захисне скло марки Qiortiq CMX (7 шт).	40 x 80	100			~ 0,83
	3.2. Адгезивний шар з прозорого силікону марки RTV-S690 (7 шт).	40 x 80	30			0,09
	3.3. Кремнієвий захисний діод типу S By-pass diode компанії Azur space (7 шт).	10,9x10,9	30			0,03
	3.4. Гнучка основа модуля з теплопровідного фольгованого поліімідного діелектрика марки ЛТУ-ТФПА15-10 (Al-15 мкм, Pi – 10 мкм) з теплопровідністю від 0,8 до 2,0 Вт/м•К.	327 × 82	25			1,4

3. КТР вдосконалених БС на углепластикових надлегких панелях та Al-Pi сонячних модулях для КА CubeSat – 3U

При виборі КТР нових вдосконалених БС на углепластикових надлегких панелях для КА класу CubeSat – 3U були запропоновані наступні технічні рішення, що забезпечують їх високі міцнісні та фізико-механічні характеристики при суттєво покращених енергомасових показниках.

Надлегка панель БС представляє собою плоску конструкцію на основі багатошарового углепластика з розмірами 327 x 82 мм і сумарною товщиною не більше 600 мкм. Загальна маса панелі БС не перевищує 23 г (0,7 кг/м²). На фронтальну поверхню углепластикової основи панелі БС приклеєна електрично ізолююча теплопровідна Pi плівка виробництва компанії ТОВ «НВП «ЛТУ» марки ЛТУ-ТПМ30 з теплопровідністю в діапазоні від 0,8 до 2,0 Вт/(м•К) з товщиною порядку 30 мкм [19]. Pi плівка приклеєна за допомогою RTV-силікону марки RTV-S691 Wacker Chemie AG (Німеччина) з теплопровідністю 0,39 Вт/(м•К) і питомою щільністю порядку 1,42 г/см³. При цьому клейовий шар з адгезивного матеріалу RTV-S691 має товщину близько 25 мкм.

На теплопровідну Pi плівку, яка покриває углепластикову панель БС, встановлений умовно гнучкий надлегкий сонячний модуль на основі ФП марки 3G30C – Advanced, 80 мкм. надлегкий сонячний модуль з ККД 30 % має товщину близько 235 мкм та масу приблизно 18,55 г. Сонячний модуль приклеєний до Pi плівки на панелі БС за допомогою адгезивного матеріалу RTV-S691 з товщиною клейового шару близько 25 мкм. Жорстка надлегка углепластикована панель БС з теплопровідним Pi покриттям забезпечує покращені теплові характеристики ФП у сонячному модулі та гарантує високу надійність і тривалість експлуатації БС, зокрема за плюсових температур до 85 °С.

Нові підходи при створенні вдосконалених надлегких БС для надмалих КА на углепластикових панелях та Al-Pi сонячних модулях для КА класу CubeSat – 3U дозволяють забезпечити можливість виготовлення БС з розмірами 327 x 82 мм з загальною товщиною не більше 840 мкм. При цьому загальна маса БС може бути не більше 42 г. Розрахункова питома енерговіддача БС на основі захищених тонких ФП марки 3G30C – Advanced, 80 мкм на початок ТАІ для умов АМ0, T= 25°C по площі становить близько 336 Вт/м². Розрахункова питома енерговіддача БС по масі становить не менше 200 Вт/кг.

Висновок

Нові підходи для вибору КТР вдосконалених умовно гнучких надлегких сонячних модулів на гнучких Al-Pi платах з застосуванням у них найбільш сучасних тонких багатоперехідних GaAs ФП нового покоління з ККД 30 – 32 % підтверджують принципову можливість виготовлення умовно гнучких надлегких сонячних модулів площею близько 250 см² з питомою потужністю по площі близько 336 – 364 Вт/м² та суттєво збільшеною питомою потужністю по масі не менше ніж 309 – 453 Вт/кг (для ФП з ККД 30 та 32 % відповідно) на початок ТАІ для БС надмалих КА класу CubeSat, а також для сонячних модулів для БС стратосферних БПЛА (квазісупутників).

Запропонована авторським колективом технологія може бути застосована також для виготовлення вдосконалених надійно захищених БС на вуглепластикових надлегких панелях і умовно гнучких сонячних модулях на основі тонких ФП марки 3G30C – Advanced товщиною 80 мкм з ККД 30 % компанії AZUR SPACE Solar Power для КА класу CubeSat – 3U. Вибрані нові підходи дозволяють забезпечити можливість виготовлення БС з сумарною товщиною до 840 мкм та масою не більше 42 г, що в 2,5 рази менше, ніж у вітчизняного надмалого КА «GS-1» класу CubeSat – 3U. При цьому розрахункова питома енерговіддача таких БС на початок ТАІ для умов АМ0, T= 25°C по площі може становити близько 336 Вт/м². Розрахункова питома енерговіддача БС по масі може становити не менше 200 Вт/кг при питомій масі БС по площі близько 1,55 кг/м².

Список літератури:

1. Храмов Д.А. Мініатюрні супутники стандарту CubeSat // Космічна наука і технологія. 2009. Т. 15. № 3. С. 21–31.
2. Науково-технічні засади розробки, виготовлення та експлуатації систем електропостачання космічних апаратів : моногр. / К.В. Безручко, В.М. Борщов, М.В. Замірець, О.М. Лістратенко та ін. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. Н. С. Жуковського «ХАІ», 2011. 218 с.
3. CubeSat Solar Panels <https://www.isispace.nl/product/isis-cubesat-solar-panels> // офіційний сайт.
4. Clyde Space Ltd. Small Satellite Solar Panels // High Efficiency Solar Arrays For all Types Small Satellites and CubeSats, <http://www.clyde-space.com>. // офіційний сайт.
5. CubeSat Solar Panels, <http://dhvtechnology.com/pages/products/cubesat-solar-panel> // офіційний сайт.
6. CubeSat Solar Panels, <https://www.endurosat.com/cubesat-category/cubesat-solar-panels> // офіційний сайт
7. Борщов В.М., Лістратенко А.М., Проценко М.А., Тимчук І.Т. та ін. Сучасні комплектуючі та матеріали для вітчизняних сонячних батарей (СБ) космічного призначення // Радіотехніка. 2019. Вип. 199. С.12–28.
8. Сучасні технології малих космічних апаратів <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa-2020/power>.
9. Сонячні батареї автоматичних космічних апаратів (компонування на КА, конструкція вузлів, проектні розрахунки) / К.В. Безручко, В.Ф. Гайдуков, С.В. Губін, В.І. Драновський та ін. : навч. посіб. для техн. вишів і спец. аерокосм. профілю. Харків : Нац. аерокосм. ун-т, 2001. 276 с.
10. Strobl G.F.X., Fuhrmann D., Guter W., Khorenko V., Köstler W. and Meusel M. About AZUR's 3G30-advanced Space Solar Cell and next Generation Product // Proc. of the 27th EUPVSEC, Frankfurt, p. 1B010.3, 2012.
11. Strobl G.F.X., Ebel L., Fuhrmann D., Guter W., Kern R., Khorenko V., Köstler W., Meusel M. Development of lightweight space solar cells with 30 % efficiency at end of life // Proc. of the 40th IEEE PVSC Conference, Denver/Colorado, June 8-13, 2014.
12. Борщов В.Н., Антонова В.А., Лістратенко А.М., Тимчук І.Т. Модуль фотоперетворювачів на основі поліімідного носія для сонячних батарей космічного застосування // Технологія приладобудування. 2002. №1. С.19–21.
13. Патент України на винахід № 85333 “Спосіб виготовлення гнучкого модуля сонячної батареї”/ Борщов В.М., Лістратенко О.М., Антонова В.А., Тимчук І.Т., Буєров Г.В., Костишин Я.Я., Проценко М.А. Дата реєстрації 12.01.2009 р.
14. CESI Patent 0001356624- 3/3/2009.
15. Коваленко В.А. Фундаментальні характеристики полімерних композиційних матеріалів та їхній вплив на показники якості конструкцій ракетно-космічної техніки // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : зб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. М.С. Жуковського «ХАІ». Вип. 51. Харків : ХАІ, 2011. С. 66–74.
16. Гаврилко В.В., Коваленко В.А., Кондрат'єв О.В., Потапов О.М. Розробка макетного зразку та технології виготовлення тестової панелі сонячної батареї космічного апарату // Питання проектування та виробництва конструкцій літальних апаратів : зб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. М.С. Жуковського «ХАІ». Вип. 3 (71). Харків : ХАІ, 2012. С. 110–117.
17. Strobl G.F.X., Fuhrmann D., Guter W., Khorenko V., Köstler W. and Meusel M. About AZUR's 3G30-advanced Space Solar Cell and next Generation Product // Proc. of the 27th EUPVSEC, Frankfurt, p. 1B010.3, 2012.
18. Strobl G.F.X., L. Ebel, Fuhrmann D., Guter W., R. Kern, Khorenko V., Köstler W., Meusel M. Development of lightweight space solar cells with 30 % efficiency at end of life.
19. Заявка на корисну модель України № u 2024 01467 «Спосіб виготовлення гнучкого теплопровідного лакофольгового поліімідного матеріалу». Дата реєстрації 19.03.2024 р. Винахідники: Нікітський Г.І., Лістратенко О.М., Кравченко О.В., Борщов І.В.

Надійшла до редколегії 07.10.2024

Відомості про авторів:

Борщов Вячеслав Миколайович – д-р техн. наук, професор, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», перший заступник директора – головний конструктор; Україна; e-mail: viatcheslav.borshchov@cern.ch; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5579-8932>

Лістратенко Олександр Михайлович – канд. техн. наук, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», провідний науковий співробітник; Україна; e-mail: sasha.listratenko.12@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7643-5295>

Проценко Максим Анатолійович – канд. техн. наук, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», начальник відділення – заступник головного конструктора; Україна; e-mail: max.protsenko.1978@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9313-1701>

Тимчук Ігор Трохимович – канд. техн. наук, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», головний технолог; Україна; e-mail: ihortymchuk78@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6436-7253>

Кравченко Олександр Вікторович – ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», начальник відділу; Україна; e-mail: kravcenkoaleksandr671@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7145-4304>

Білоусов Костянтин Георгійович – ДП «КБ «Південне», головний конструктор; Україна; e-mail: cgbelousov@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6436-3359>

Перекопський Іван Терентійович – ДП «КБ «Південне», начальник сектору; Україна; e-mail: perekop25@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5420-1280>

О.В. КАЗАНКО, О.Є ПЕНКІНА

**ДОСЛІДЖЕННЯ ФЛОКЕ-БЛОХІВСЬКИХ ХВИЛЬ
У ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД СПЕКТРАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА
ДЛЯ ОДНОВИМІРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛА****Вступ**

У зв'язку зі стрімким розвитком такої галузі науки та техніки як фотоніка в останні десятиріччя (приблизно з 90-х років ХХ сторіччя) науковий інтерес до оптичного діапазону електромагнітного випромінювання продовжує зберігати актуальність [1]. Разом з тим актуальність зберігає й задача про розсіяння електромагнітних хвиль (дифракційна задача) на таких об'єктах як фотонні кристали. Наявність заборонених та дозволених зон в параметрах дифракційних процесів на цих кристалічних структурах є одним з основних феноменів, завдяки яким останні здебільше й зарекомендували своє практичне застосування [2, 3].

У роботі проводиться аналіз розсіювальних характеристик двошарової фотонно-кристалічної структури на предмет світлового відгуку, кількісне розуміння яких пов'язується з розв'язанням скалярного хвильового рівняння для даного кристала (далі, *вихідне хвильове рівняння*). А саме, йдеться про розсіяння плоскої монохроматичної ТЕ-поляризованої електромагнітної хвилі на одновимірному фотонному кристалі з періодом l . Таке хвильове рівняння є лінійним диференціальним рівнянням 2-го порядку з частковими похідними та може розв'язуватись *методом розділення змінних* [4]. Для структур, які розглядаються, зазначений метод розділення змінних дозволяє отримати розв'язок хвильового рівняння, який у такому разі виявляється рівнянням з кусково-сталими періодичними коефіцієнтами (точніше, період коефіцієнтів дорівнює періоду кристала), у явному вигляді [5].

Завдяки можливості отримати розв'язки хвильових рівнянь для шаруватих середовищ у явному вигляді, вивчення процесів дифракції у цих середовищах виводиться на якісно вищий рівень. Як наслідок, є багато літератури та періодики, присвяченої саме розповсюдженню хвиль у шаруватих середовищах. З іншого боку, змога керувати зональним розподілом в параметрах дифракційних процесів, сполучаючи різні матеріали та варіюючи геометричними параметрами структури, відкриває шляхи до всілякого різноманітного практичного застосування шаруватих періодичних структур. Отже, розв'язки хвильового рівняння у явному вигляді плюс практичне застосування шаруватих періодичних структур створює широке поле діяльності для інженерів-дослідників різних кваліфікацій та напрямів.

Із загальної теорії рівнянь з частковими похідними відомо, що розв'язання хвильового рівняння методом розділення змінних в ортогональних координатах приводить до проблеми Штурма–Ліувілля (проблеми про побудову повної ортогональної системи функцій, кожний елемент якої задовольняє деякому лінійному диференціальному рівнянню 2-го порядку), яка в свою чергу може розв'язуватися як спектральна проблема (на власні числа та власні функції) для лінійного диференціального оператора 2-го порядку. Так формулюється абстрактна постановка проблеми. При розв'язанні окремих рівнянь маємо свою конкретику щодо особливостей забезпечення умов розв'язності проблеми Штурма–Ліувілля. Звернемо увагу на одну із найбільш важливих з практичної точки зору умов розв'язності цієї проблеми – умову про самоспряженість диференціального оператора, необхідність у забезпеченні якої породжує задачу про виділення простору самоспряженості. Нехай $LZ = -\beta^2 Z$ – спектральне рівняння у проблемі Штурма–Ліувілля, L – лінійний диференціальний оператор 2-го порядку, β – спектральний параметр, просторова змінна. Із загальної теорії відомо, що функції u , які задані на проміжку (a, b) та задовольняють умові $Lu(a) = u(b)$, $L\bar{1} = 1$ (L – комплексне число) можуть послужити основою для виділення простору самоспряженості лінійного диференціального оператора 2-го порядку. Справді, якщо висловитись загалом, то за визначенням самоспряженого оператора маємо $(Lu, v) = (u, Lv)$, для будь-яких функцій u, v

(L – лінійний диференціальний оператор, $(*, **)$ – скалярний добуток), тобто маємо інтегральне перетворення з деякими кінцевими або некінцевими границями інтегрування (рівняння у часткових похідних розв’язуються у гільбертових просторах з інтегральним скалярним добутком, таких як простір Лебега, Соболева, Безиковича) [4, 6 – 8].

Таким чином, спираючись на самі загальні міркування вирисовується зрозумілий зв’язок між границями інтегрування та границями проміжку визначення функцій. Отож, якою б не була методика забезпечення умови самоспряженості $(Lu, v) = (u, Lv)$, досліднику доводиться враховувати границі інтегрування (оскільки інтеграл залежить від границь інтегрування). Звідки передбачається висновок про те, що для кінцевих проміжків граничні точки відіграють значну роль у забезпеченні умови самоспряженості (якщо граничні точки збігаються з границями інтегрування). Проте, хвильове рівняння для одновимірного фотонного кристала (вихідне хвильове рівняння) розв’язується на необмеженому проміжку $(-\infty, +\infty)$, тому справедливо виникає питання про те, як забезпечити умову самоспряженості на проміжку, що немає граничних точок. Подолати такий перепоп дозволяє *метод матриці перенесення*, який може використовуватися для диференціальних рівнянь з періодичними коефіцієнтами (Transfer matrix method, докладно описується, наприклад, у [5]). Суть методу ґрунтується на побудові лінійного оператора T , що діє у двовимірному просторі розв’язків (площині розв’язків) спектрального рівняння $LZ = -\beta^2 Z$ та розв’язку $Z(z - l)$ ставить у відповідність розв’язок $Z(z)$: $T: Z(z - l) \rightarrow Z(z)$, l – період, $z \in (-\infty, +\infty)$ незалежна просторова змінна (лінійність перевіряється безпосередньо зо визначенням). Оскільки, у кінцевовимірних просторах лінійний оператор однозначно задається деякою матрицею, то T є квадратна матриця розміром 2×2 (тобто оператор T ототожнюється з матрицею) [5].

Отже, можливість говорити про управління фотонними забороненими зонами щораз більше підживлює інтерес багатьох фахівців різних наукових галузей до глибшого та різнобічно досліджування дифракційних процесів у кристалах (управління відбувається за рахунок зміни геометричних та матеріальних параметрів кристала). Кількісне розуміння характеру виникнення заборонених та дозволених зон, як відомо, дає *дисперсійне рівняння* – рівняння, що пов’язує параметри дифракційної задачі з умовами розв’язності проблеми Штурма–Ліувілля. В роботах [10, 11] розвивалася думка, що властивості функції Z як функції спектрального параметра β визначає характер поведінки дисперсійного рівняння. Тут є аналогія з напівпровідниковими матеріалами – матеріалами, які при одних якостях електромагнітного випромінювання діють як провідники, а при інших – як діелектрики.

Огляд

Інтерес до функції Z , як функції спектрального параметра β , зберігається вже у декількох роботах, що були опубліковані раніше [9 – 12] та може пов’язуватися з прагненням розуміти властивості складових членів дисперсійного рівняння. Як зазначалося у попередньому розділі, специфіка розв’язання вихідного хвильового рівняння на необмеженому проміжку $(-\infty, +\infty)$ виражається, зокрема, у тому, що такий проміжок немає граничних точок: специфіка виявляється у методиці виділення простору само спряженості. Взагалі кажучи, виділення простору самоспряженості диференціального оператора L (необхідна складова умова розв’язності проблеми Штурма–Ліувілля – є відомою задачею в загальній теорії рівнянь з частковими похідними та відповідно до відомих підходів до її вирішення). Врахувати умову самоспряженості для рівнянь з періодичними коефіцієнтами, якими є вихідне хвильове та спектральне рівняння, може допомогти метод матриці перенесення (Transfer matrix method, докладно описується, наприклад, у [5]).

Нехай T – матриця перенесення: $T: Z(z - l) \rightarrow Z(z)$. Поряд з проблемою Штурма–Ліувілля сам метод матриці перенесення передбачає підняття й ще однієї спектральної проблеми зі спектральним параметром, залежним від спектрального параметра проблеми Штурма–Ліувілля: $TZ = \Lambda Z$, $T = T_\beta$, $\Lambda = \Lambda_\beta$ – спектральний параметр. Тобто спектральної проблеми для квадратної матриці T розміром 2×2 . З базової лінійної алгебри відомо, що

невироджена квадратна матриця розміром 2×2 має не більш ніж 2-а власних числа Λ_1, Λ_2 , яким відповідають власні функції $Z_{\Lambda_1}, Z_{\Lambda_2}$. Отже, якщо вдається побудувати невірроджену матрицю перенесення T_β для будь-якого β , то маємо наступну тотожність:

$$\Lambda_{1,2} Z_{\Lambda_{1,2}}(z-l) = Z(z), z \in (-\infty, +\infty). \quad (1)$$

Ця тотожність виконується для будь-якого β , проте, не для будь-якого β виконується рівність $\Lambda_{1,2} \overline{\Lambda_{1,2}} = 1$. Більше того, теоретично передбачається, що при виконанні всіх умов розв'язності проблеми Штурма–Ліувілля існує лише дискретна послідовність значень спектрального параметра β_n , така що $\Lambda_{1,2} \overline{\Lambda_{1,2}} = 1$ (причому, β_n немає точок згущення: $\beta_n \rightarrow \infty$). Таким чином, накладаючи умову $\Lambda_{1,2} \overline{\Lambda_{1,2}} = 1$ на тотожність (1), отримуємо наступне скалярне рівняння відносно параметра β :

$$\Lambda_1 Z_{\Lambda_1}(z-l) = Z_{\Lambda_1}(z), \Lambda_1 \overline{\Lambda_1} = 1 \Leftrightarrow \Lambda_\beta Z(z-l) = Z_\beta(z), \Lambda_\beta \overline{\Lambda_\beta} = 1, z \in (-\infty, +\infty). \quad (2)$$

(вибір власного числа Λ_1 або Λ_2 не є принциповим, $\Lambda_1 = \Lambda_\beta$). Таке рівняння виконує сполучувачу роль між умовами розв'язності проблеми Штурма–Ліувілля та параметрами вихідної дифракційної задачі та являє собою дисперсійне рівняння одновимірного фотонного кристала у загальному вигляді. З останнього перетворення видно, що функція Z є основним складовим членом рівняння, тому розумно припускати думки, що поведінка цього рівняння здебільше залежатиме від Z .

Дослідження дисперсійного рівняння для одновимірного фотонного кристала проводилась багатьма авторами [13 – 17]. Однак ці дослідження здебільше були чисельними та передбачали перехід до конкретних складових членів функції Z розв'язку спектрального рівняння у проблемі Штурма–Ліувілля: нормалізовану систему фундаментальних розв'язків з фіксованою точкою нормалізації, вибір системи координат, вибір точки відліку (точка відліку знаходиться на межі розподілу шарів кристала або усередині). На противагу цьому автори орієнтуються на виявлення загальних властивостей, оскільки окремі складові члени, виявляючи ті чи інші властивості, не обов'язково виявляють властивості самого об'єкту, який відповідно утворений цими членами (принцип емерджентної). Авторам роботи видається важливим продовжувати вдаватися до спроб зрозуміти загальні властивості дисперсійного рівняння одновимірного фотонного кристала шляхом вивчення поведінки функції Z як функції спектрального параметра β . У роботах [9–12] було з'ясовано, що перша похідна від Z за спектральним параметром представляється лінійно через саму функцію та свою похідну, але за просторовою змінною. Цей результат наводить на думку про ідентичний характер представлення й другої похідної. В свою чергу, змога мати два лінійних представлення дає можливість записати лінійне однорідне диференціальне рівняння 2-го порядку відносно функції Z та сподіватися на подальшу піддатливість до вивчення.

Перша похідна Z' відшукується як розв'язок наступного лінійного неоднорідного диференціального рівняння 2-го порядку [9–12] (рівняння отримується шляхом взяття похідної від спектрального рівняння за спектральним параметром: $LZ = -\beta^2 Z \Leftrightarrow LZ' + \beta^2 Z' = -2\beta Z$):

$$\left(\frac{1}{\mu} \dot{\psi}\right) + \frac{\xi \beta}{\mu} \psi = -2 \frac{\beta}{\mu} Z, \quad (3)$$

тут $\psi = Z'$ – шукана функція. Розв'язок (точніше, частковий розв'язок) такого рівняння на кінцевому проміжку $[\frac{d}{2}-l, \frac{d}{2}]$ записується у наступному вигляді

$$\psi_0 = -\frac{1}{2} \xi Z + \xi \dot{Z}, \quad (4)$$

де функція ξ обертається в нуль на межі розподілу середовищ: $\xi|_{\frac{-d}{2}} = 0$ (цією вимогою забезпечується неперервність розв'язку ψ_0 , оскільки похідна \dot{Z} може потерпати стрибок [10, 11]), $\xi = \int_{\frac{-d}{2}} \phi$, ϕ – розв'язок рівняння:

$$\left(\frac{1}{\mu} \dot{\phi}\right) + 4 \frac{\varsigma_{\beta}^2}{\mu} \phi = 4 \frac{\beta}{\mu}. \quad (5)$$

Це рівняння являє собою лінійне неоднорідне рівняння з кусково-сталою правою частиною та може розв'язуватися методом варіації [18]. Цікавим, на думку авторів, є рівняння, яке отримується шляхом диференціювання останнього за спектральним параметром β (питання щодо існування мішаних похідних обговорювалися у роботах [8, 9]):

$$\left(\frac{1}{\mu} \dot{\phi}'\right) + 4 \frac{\varsigma_{\beta}^2}{\mu} \phi' = -4 \cdot 2 \frac{\beta}{\mu} \phi + 4 \frac{1}{\mu} \Leftrightarrow \left(\frac{1}{\mu} \dot{\phi}'\right) + 4 \frac{\varsigma_{\beta}^2}{\mu} \phi' = 4(2\beta\phi - 1) \frac{1}{\mu}. \quad (6)$$

Загальним методом розв'язання як рівняння (3), так й новозаписаного рівняння, вважається метод варіації [18]. Проте отримати розв'язок цим методом у прийнятному вигляді, схоже, не вдається: не вдається отримати вільне від знаку інтеграла перетворення. Як й у випадку з першою похідною, коли було отримано розв'язок неоднорідного рівняння (3) [10], тут справедливо також говорити про неочікуваний неочевидний оригінальний результат. Таке рівняння виникало на шляху до спроби виразити другу похідну від функції Z за спектральним параметром β .

Друга похідна Z'' відшукується як розв'язок лінійного неоднорідного диференціального рівняння 2-го порядку [11] (рівняння отримується шляхом взяття другої похідної від спектрального рівняння за спектральним параметром: $LZ = -\beta^2 Z \Leftrightarrow LZ' + \beta^2 Z' = -2\beta Z \Leftrightarrow LZ'' + \beta^2 Z'' = -2\beta Z' - 2Z - 2\beta Z'$, $LZ'' - \beta^2 Z'' = -2Z - 4\beta Z'$ – інваріантність порядку дії оператора та взяття похідної пов'язана з відсутністю залежності від спектрального параметра у коефіцієнтах оператора):

$$\left(\frac{1}{\mu} \dot{\phi}'\right) + 4 \frac{\varsigma_{\beta}^2}{\mu} \phi' \left(\frac{1}{\mu} \dot{\phi}\right) + \frac{\varsigma_{\beta}^2}{\mu} \phi = -2 \frac{1}{\mu} Z - 4 \frac{\beta}{\mu} Z' \frac{1}{\mu}, \quad (7)$$

тут $\phi = Z'$ – шукана функція.

Нехай $\phi = \eta Z' + \chi Z' + \nu Z + \tau Z$, де η, χ, ν, τ – деякі функції (підкреслимо, що коефіцієнти χ, τ обертається в нуль на межі розподілу середовищ й, таким чином, забезпечують неперервність [10, 11], шуканого розв'язку ϕ . За принципом невизначених коефіцієнтів ця підстановка приводить до системи 2-х лінійних неоднорідних диференціальних рівнянь 2-го порядку відносно функцій $\dot{\chi}, \dot{\tau}$ (функції η, ν виключаються), що й було показано у [12]:

$$\begin{cases} \left(\dot{\chi} \frac{1}{\mu}\right) + 4 \frac{\varsigma_{\beta}^2}{\mu} \dot{\chi} = 8 \frac{\beta}{\mu} \\ \left(\dot{\tau} \frac{1}{\mu}\right) + 4 \frac{\beta}{\mu} \dot{\chi} + 4 \frac{\varsigma_{\beta}^2}{\mu} \dot{\tau} = 8 \frac{1}{\mu} \end{cases}$$

Або, у векторно-матричній формі остання система записується:

$$\left[\begin{pmatrix} \frac{1}{\mu} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\mu} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\chi} \\ \dot{\tau} \end{pmatrix} \right] + \frac{4}{\mu} \begin{pmatrix} \varsigma_{\beta} & 0 \\ \frac{1}{2} \frac{\beta}{\varsigma_{\beta}} & \varsigma_{\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\chi} \\ \dot{\tau} \end{pmatrix} = \frac{8}{\mu} \begin{pmatrix} \beta \\ 1 \end{pmatrix},$$

де

$$\begin{pmatrix} \varsigma_{\beta} & 0 \\ \frac{1}{2} \frac{\beta}{\varsigma_{\beta}} & \varsigma_{\beta} \end{pmatrix}^2 = \begin{pmatrix} \varsigma_{\beta} & 0 \\ \frac{1}{2} \frac{\beta}{\varsigma_{\beta}} & \varsigma_{\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varsigma_{\beta} & 0 \\ \frac{1}{2} \frac{\beta}{\varsigma_{\beta}} & \varsigma_{\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varsigma_{\beta}^2 & 0 \\ \beta & \varsigma_{\beta}^2 \end{pmatrix}.$$

Отже, маємо матричне рівняння

$$\left[\frac{1}{\mu} I \dot{X} \right] + \frac{4}{\mu} \zeta^2 X = 8 \frac{1}{\mu} F, \quad (8)$$

тут

$$\zeta = \begin{pmatrix} \zeta_\beta & 0 \\ \frac{1}{2} \frac{\beta}{\zeta_\beta} & \zeta_\beta \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} \beta \\ 1 \end{pmatrix}, I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

X – шукана матриця. Приходимо до матричного неоднорідного рівняння, яке розв’язується методом варіації. За аналогією зі скалярним рівнянням останнє має два матричні (фундаментальні) розв’язки. Безпосередньою підстановкою переконуємось, що такі розв’язки матимуть вигляд

$$X_1(z) = \cos 2\zeta(z + \frac{d}{2}), X_2(z) = \mu \zeta^{-1} \sin \zeta(z + \frac{d}{2}) \quad (9)$$

За методом варіації розв’язок будемо відшукувати у вигляді $X_0 = X_1 C_1 + X_2 C_2$, де $C_1 = C_1(z)$, $C_2 = C_2(z)$ – матриці. Запишемо похідні та послідовно підставимо у рівняння (10):

$$\dot{X}_0 = \dot{X}_1 C_1 + X_1 \dot{C}_1 + \dot{X}_2 C_2 + X_2 \dot{C}_2,$$

За методом варіації припускаємо, що $X_1 \dot{C}_1 + X_2 \dot{C}_2 = 0$, тоді

$$\left(\frac{1}{\mu} \dot{X}_0 \right) = \left(\dot{X}_1 \frac{1}{\mu} C_1 \right) + \left(\dot{X}_2 \frac{1}{\mu} C_2 \right) \Rightarrow \left(\dot{X}_1 \frac{1}{\mu} \right) C_1 + \dot{X}_1 \frac{1}{\mu} \dot{C}_1 + \left(\dot{X}_2 \frac{1}{\mu} \right) C_2 + \dot{X}_2 \frac{1}{\mu} \dot{C}_2,$$

далі

$$\left(\frac{1}{\mu} \dot{X}_0 \right) + \frac{\zeta^2}{\mu} X_0 \Rightarrow \left(\left(\dot{X}_1 \frac{1}{\mu} \right) + \frac{\zeta^2}{\mu} X_1 \right) C_1 + \dot{X}_1 \frac{1}{\mu} \dot{C}_1 + \left(\left(\dot{X}_2 \frac{1}{\mu} \right) + \frac{\zeta^2}{\mu} X_2 \right) C_2 + \dot{X}_2 \frac{1}{\mu} \dot{C}_2.$$

Тут важливо зауважити, що матриці X_1 , X_2 виявляються перестановочними, що істотно спрощує перетворення у методі варіації (перевіряється безпосереднім перемноженням). Використання методу варіації допомогло побачити неочевидний зв’язок між рівнянням, що виникає у проміжних викладах при підстановці $\varphi = \eta Z' + \chi \dot{Z}' + \nu Z + \tau \dot{Z}$ та рівнянням, яке маємо шляхом взяття похідної за спектральним параметром від рівняння (5). А також зрозумілими стає походження функцій ξ . За методом варіації шукані матричні функції \dot{C}_1 , \dot{C}_2 знаходяться як розв’язок наступної матричної системи рівнянь:

$$\begin{cases} X_1 \dot{C}_1 + X_2 \dot{C}_2 = 0 \\ \dot{X}_1 \frac{1}{\mu} \dot{C}_1 + \dot{X}_2 \frac{1}{\mu} \dot{C}_2 = F \end{cases}$$

Звідки записуємо,

$$\dot{C}_1 = -X_1^{-1} X_2 \dot{C}_2 \Rightarrow -\dot{X}_1 \frac{1}{\mu} X_1^{-1} X_2 \dot{C}_2 + \dot{X}_2 \frac{1}{\mu} \dot{C}_2 = F \Rightarrow \left(-\dot{X}_1 \frac{1}{\mu} X_1^{-1} X_2 + \dot{X}_2 \frac{1}{\mu} \right) \dot{C}_2 = F \Rightarrow$$

$$\left(-\dot{X}_1 \frac{1}{\mu} X_1^{-1} X_2 X_1 + \dot{X}_2 \frac{1}{\mu} X_1 \right) X_1^{-1} \dot{C}_2 = F \Rightarrow \dot{C}_2 = \left(-\dot{X}_1 \frac{1}{\mu} X_2 + \dot{X}_2 \frac{1}{\mu} X_1 \right)^{-1} X_1 F \Rightarrow C_2 = W \int X_1 F$$

$$\text{Аналогічно } C_1 = W \int X_2 F, W = \dot{X}_1 \frac{1}{\mu} X_2 + \dot{X}_2 \frac{1}{\mu} X_1.$$

Основна частина

У роботах [10, 11] відмічалось, що змога мати два лінійних представлення дає можливість записати лінійне рівняння відносно функції Z . Автори цієї роботи продовжують працювати над питанням щодо змоги лінійно представити другу похідну від функції Z за спектра-

льним параметром β , тобто представити аналогічно вигляду першої похідної за формулою (4).

Робота [12] присвячена пошуку другої похідної – це перша робота з авторських трудів з визначення другої похідної від розв’язку спектрального рівняння за спектральним параметром. У роботі розвивалася думка, що розв’язок рівняння (7) може відшукуватися у вигляді лінійного представлення через сам розв’язок та свою похідну, але за просторовою змінною. По суті ця думка є спробою провести аналогію між розв’язанням рівнянням (4) та рівнянням (6), тобто аналогію з методикою пошуків першої похідної. Один з основних висновків тогочасних досліджень довелося зробити не на користь змоги побачити пряму аналогію.

Втім, подальші дослідження та результати цієї роботи, з одного боку, вигляд запропонованої у роботі [12] підстановки передбачається безпосереднім взяттям похідної від представлення (5). А з іншого боку, було показано, що застосування підстановки приводить до матричного рівняння (10). Застосування методу варіації до такого матричного рівняння (10) показало нагоду відшукати розв’язок у вигляді $\varphi = \eta Z + \chi \dot{Z}$, а разом із тим – переосмислити висновок про можливість визначення функцій ξ , ξ' . Виявилось, що рівняння, яке виникає у проміжних викладах при здійсненні підстановки для φ є не чим іншим, як похідною від рівняння (5) за спектральним параметром. Це спостереження не є очевидним, оскільки універсальний метод варіації не дає змоги прийти до цього висновку.

Здійснюючи підстановку (4) у правій частині рівняння (5), виключаємо член Z' :

$$L\varphi = -2\frac{1}{\mu}Z - 4\frac{\beta}{\mu}\left(-\frac{1}{2}\dot{\xi}Z + \xi\dot{Z}\right) \equiv -2\frac{1}{\mu}Z + 4\frac{\beta}{\mu}\cdot\frac{1}{2}\dot{\xi}Z - 4\frac{\beta}{\mu}\xi\dot{Z},$$

зводимо доданки при функціях Z , \dot{Z} :

$$L\varphi = 2(\beta\dot{\xi} - 1)\frac{1}{\mu}Z - 4\frac{\beta}{\mu}\xi\dot{Z}, \quad (10)$$

приходимо до наступного лінійного неоднорідного диференціального рівняння 2-го порядку для знаходження другої похідної:

$$\left(\frac{1}{\mu}\dot{\varphi}\right) + \frac{\zeta_{\beta}^2}{\mu}\varphi = 2(\beta\dot{\xi} - 1)\frac{1}{\mu}Z - 4\beta\xi\frac{1}{\mu}\dot{Z}.$$

Далі, опускаючи деякі проміжні виклади, за принципом невизначених коефіцієнтів, розв’язок останнього рівняння будемо шукати у вигляді $\varphi = \eta Z + \chi \dot{Z}$ (аналогія з пошуками першої похідної),

$$L\varphi = \left(\left(\dot{\eta}\frac{1}{\mu}\right) - 2\frac{\zeta_{\beta}^2}{\mu}\chi\right)Z + (\dot{\chi} + 2\dot{\eta})\frac{1}{\mu}\dot{Z}.$$

Переходимо до системи двох рівнянь відносно функцій η , χ :

$$\dot{\chi} + 2\dot{\eta} = -4\beta\xi, \quad \left(\dot{\eta}\frac{1}{\mu}\right) - 2\frac{\zeta_{\beta}^2}{\mu}\chi = 2(\beta\dot{\xi} - 1)\frac{1}{\mu}.$$

Звідки записуємо

$$\dot{\chi} + 2\dot{\eta} = -4\beta\xi \Rightarrow \dot{\eta} = -\frac{1}{2}\dot{\chi} - 2\beta\xi \Rightarrow \{\vartheta = \dot{\chi}\}, \quad \eta = -\frac{1}{2}\vartheta - 2\beta \int \xi.$$

Підставляємо в інше рівняння системи:

$$-\frac{1}{2}\left(\dot{\vartheta}\frac{1}{\mu}\right) - 2\frac{\zeta_{\beta}^2}{\mu}\vartheta = 2\beta\xi\frac{1}{\mu} + 2(\beta\dot{\xi} - 1)\frac{1}{\mu} \Leftrightarrow \left(\dot{\vartheta}\frac{1}{\mu}\right) + 4\frac{\zeta_{\beta}^2}{\mu}\vartheta = -4(2\beta\dot{\xi} - 1)\frac{1}{\mu}.$$

Врешті маємо рівняння ідентичне рівнянню, що отримується шляхом взяття похідної за спектральним параметром від (5). Останнє рівняння отримувалось у проміжних викладах у

роботі [12], де зазначалося, що таке рівняння не є істотним спрощенням відправного рівняння (9), і тому не зрозуміло як розв'язується. Втім, це рівняння являє собою похідну від (5) й тому частковим розв'язком є функція $\vartheta = \phi'$. Тож, маємо:

$$\eta = -\frac{1}{2}\phi' - 2\beta \int \xi + \eta_0 = -\frac{1}{2}\xi' - 2\beta \int \xi + \eta_0 \Rightarrow \chi = \int \phi' = \xi'.$$

Далі виключимо з двох лінійних представлень відповідно для першої й другої похідної член \dot{Z} :

$$\begin{aligned} \xi Z'' &= -\xi \left(\frac{1}{2} \xi' + 2\beta \int \xi \right) Z + \xi \xi' \dot{Z}, \\ Z'' \xi - Z' \xi' &= \left(\frac{1}{2} \xi' \xi - \frac{1}{2} \xi \xi' - 2\beta \xi \int \xi \right) Z. \end{aligned}$$

Розділимо на ξ^2 ,

$$\frac{Z'' \xi - Z' \xi'}{\xi^2} = \left(-\frac{1}{2} \frac{\xi' \xi - \xi \xi'}{\xi^2} - 2\beta \xi \int \xi \right) Z,$$

або

$$\left(\frac{Z'}{\xi} \right)' = \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\xi}{\xi} \right)' - 2\beta \frac{1}{\xi} \int \xi \right) Z.$$

Наостанок, запишемо

$$\left(\frac{Z'}{\xi} \right)' = \left(-\frac{1}{2} \ln' \xi - 2\beta \frac{1}{\xi} \int \xi \right) Z.$$

Таким чином, отримане лінійне однорідне диференціальне рівняння відносно функції Z як функції спектрального параметра β . Функція ξ є такою ж функцією як у представленні для першої похідної. На думку авторів, таке рівняння може в перспективі допомогти виявити загальні властивості функції Z та дисперсійного рівняння (2).

Висновки

У рамках представленої роботи продовжуються здійснюватися спроби кількісно вивчати функцію Z – розв'язок спектрального рівняння у проблемі Штурма–Ліувілля для одновимірного двошарового фотонного кристала – залежно від спектрального параметра. Автори торкаються питання про можливість лінійно представити другу похідну за спектральним параметром через сам розв'язок та свою похідну, але за просторовою змінною.

Приміром, одна з проблем, що виникають при розв'язанні дисперсійного рівняння відносно спектрального параметра, пов'язана з феноменом близько дистанційованих коренів (при знаходженні власних чисел та відповідних власних функцій). Це об'єктивно існуюча проблема виявляється у досить об'ємних та часових затратах при застосуванні ЕОМ. Алгоритмічно реалізація чисельного пошуку коренів передбачає процедуру локалізації цих коренів, саме ця процедура й потребує затрат у часі. Розвиток альтернативних підходів до вивчення дисперсійного рівняння може дозволити у перспективі подивитися під іншими кутами на саме рівняння та відповідно на проблематику, пов'язану з обчисленням та локалізацією коренів.

Виявлена ідентичність проміжного викладу при застосуванні підстановки (запропонованої у [12]), яка дає матричне рівняння та рівняння, що отримане шляхом взяття похідної від (5). У роботі зауважується, що такі нечисельні дослідження у перспективі можуть послужити виявленню неописаних раніше властивостей дисперсійного рівняння, зачіпаючи й проблематику знаходження коренів. До оригінального результату цієї роботи слід віднести представлення, отримане для другої похідної у вигляді лінійного відношення самої функції та своєї

похідної. Говорити про значний поступ у напрямку формування альтернативних поглядів на дисперсійне рівняння станом натепер фактично не доводиться, проте апарат похідної відіграє важливу роль у дослідженні будь-яких функціональних залежностей. З огляду на це, розвинути погляд на дисперсійне рівняння через розв'язок спектрального рівняння, як головного члена, видається авторам важливим елементом дослідження.

У роботі виписується лінійне однорідне диференціальне рівняння 2-го порядку для розв'язку спектрального рівняння відносно спектрального параметра, а також констатується відносно неускладнення коефіцієнтів цього рівняння.

Список літератури:

1. Кожем'яко В.П., Іванов ОА, Іванов І. А. Перспективи застосування фотонних кристалів у сучасних системах обробки даних // Наук. пр. ВНТУ. Інформаційні технології та комп'ютерна техніка. № 4. Р. 1–4 с.
2. Yablonovitch E. Photonic Crystals // Journal of Modern Optics. Vol. 41, № 2. P.505–513.
3. Shmat'ko A., Kazanko A. V., Mizernik V. N., Odarenko E. N., Yampol'skii V. A., Rokshanova T. N. Proc. 8th Int. Conf. Extraordinary reflecton from photonic crystal with metamaterials. Odessa : UWBUSIS, 2016. P.160–162.
4. Маркович БМ. Рівняння математичної фізики: навчальний посібник. Львів : Львівська політехніка, 2010. 384 с.
5. Yariv A., Yeh P. Optical waves in crystals – A Wiley inteprieses Publicatuon. New York : Jon Wiley & Sons, 1987. 616 p.
6. Eastham M. S. P. The spectral theory of periodic differential equations. Edinburg: Scottish Academic Press [distributed by Chatto & Windus, London], 1975.
7. Winkler S., Magnus W. Hill's Equation. New York, London, Sydney : Interscience Publisher a division John Wiley & Sons, 1996.
8. Yakubovich V. A. and Starzhinskii V. M., Linear Differential Equations with Periodic Coefficients (Wiley, New York), 1975.
9. Казанко О.В, Пенкіна О.Є. Норма власних функцій одновимірного фотонного кристала // Вісник Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Сер. «Радіофізика та електроніка». 2021. №35. С. 91–99.
10. Казанко О.В, Пенкіна О.Є. Диференціювання дисперсійного рівняння у дифракційній задачі для необмеженого двовимірного шаруватого середовища // Експериментальні та теоретичні дослідження у сучасних науках : зб. наук. пр. "Логос" (ЛОГОС) з матеріалами наук.-практ. конференції. Краків, Польща : Європейська наукова платформа, 2019. С. 36–42 с.
11. Казанко О. В. & Пенкіна О. Є. Аналіз складових членів дисперсійного рівняння у задачі про дифракцію плоского монохроматичного коливання у двовимірному необмеженому двошаровому середовищі з метаматеріалом // Зб. наук. пр. "Грааль науки". 2021. № 6. С. 210–216.
12. Казанко О.В., Пенкіна О.Є. Аналіз та методологія визначення норми власних функцій як граничний перехід у скалярному добутку в спектральній проблемі Штурма-Ліувілля для фотонного одновимірного кристала // Вісник Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Сер. «Радіофізика та електроніка». 2023. Вип. 39. С. 41–50.
13. Guida G. Introduction to photonic band gap materials // Progress In Electromagnetics Research. 2003. №41. P. 1–20.
14. Gaughan Richard. Researchers Create Tunable Photonic Bandgap Crystal // Photonics Spectra. 2000. Vol. 34. №1.
15. Pandey G. N., Thapa K. B., Srivastava S. K., Ojha S. P. Band structures and abnormal behavior of one dimensional photonic crystal containing negative index materials // Progress In Electromagnetics Research M. 2008. Vol. 2. P. 15–36.
16. Morozov G.V., Sprung D. W. L. Floquet-Bloch waves in one-dimensional photonic crystal // A Letters Journal Exploring Physics, EPL, 96, 2011: 54005:p1-p5.
17. Sprung D. W. L., Wu H. and Martorell J. // Am. J. Phys., 61 (1993) 1118.
18. Самойленко А., Перестюк М., Парасюк І. Диференціальні рівняння : підручник для студ. мат. спец. 2-ге вид. Київ : Либідь, 2003. 301 с.

Надійшла до редколегії 02.11.2024

Відомості про авторів:

Казанко Олександр Віталійович – Український державний університет залізничного транспорту, асистент кафедри обчислювальної техніки та систем управління, Україна; e-mail: a_kazanko@i.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9202-8008>

Пенкіна Ольга Євгенівна – Український державний університет залізничного транспорту, старший викладач кафедри обчислювальної техніки та систем управління, Україна; e-mail: penkina@kart.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9804-6685>

*В.В. ДОВГИЙ, канд. техн. наук, А.І. ТЕРЛЕЦЬКИЙ, канд. фіз.-мат. наук,
В.М. ГРИГА, канд. техн. наук, І.В. СВИД, канд. техн. наук.*

**АНАЛІЗ ЦИФРОВИХ ІНТЕРФЕЙСІВ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ
У КАНАЛАХ ЗВ'ЯЗКУ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ**

Вступ

Для передачі цифрових даних (потоків бітів) каналами зв'язку від одного пристрою до іншого необхідна висока ступінь взаємодії та узгодженості обладнання. Однією із ключових вимог у цьому процесі є синхронізація. Приймач цифрових даних повинен знати швидкість, з якою він приймає біти, щоб через рівні проміжки часу проводити вибірки, які дозволяють точно визначити значення кожного біта. Для цього використовуються дві технології передачі: асинхронна та синхронна [1 – 3].

Цифровий інтерфейс відіграє важливу роль у забезпеченні передачі даних. Він визначає не лише електричні характеристики сигналу, а й фізичні засоби приєднання до середовища, а також процедури прийому та передачі даних [3, 4]. На етапі налаштування важливо забезпечити оптимальну взаємодію між пристроями, які обмінюються інформацією, а також врахувати особливості кожного типу передачі, такі як затримки сигналу, рівні шумів та параметри синхронізації [4 – 7].

Різноманіття методів кодування цифрових даних, наприклад NRZ-L, манчестерське кодування чи QPSK, забезпечує адаптацію технологій до вимог багатьох систем. Кожен із цих методів має свої переваги та недоліки залежно від умов передачі та типу сигналу [1, 2].

В роботі проведено аналіз цифрових інтерфейсів передачі даних, включаючи їхню структуру, принципи роботи, а також аналіз переваг і недоліків асинхронної та синхронної передачі. Розглянуто основні методи організації каналів зв'язку та специфіку програмування модемів і мультиплексорів для забезпечення ефективної передачі інформації. Представлені матеріали можуть бути корисними для науковців, інженерів і фахівців, які займаються розробкою та впровадженням інформаційних систем [1, 3].

Передача даних каналами зв'язку. Основні поняття

Два пристрої, які з'єднані передавальним середовищем, з метою обміну цифровими даними, повинні бути у високій степені узгодженості [2, 3]. Цифрові дані, як правило, передаються через середовище по одному біту в кожний момент часу. Такий процес передачі вимагає синхронізації приймача і передавача, а саме узгодження швидкості передачі, тривалості передачі, інтервалами між бітами. При такій передачі існує два методи управління даним процесом – синхронний і асинхронний. При послідовній передачі за один раз передається один сигнальний елемент, розмір якого визначається способом кодування [5]:

- менше одного біта (прикладом цього може бути манчестерське кодування, в якому «0» – перехід з високого рівня на низький всередині інтервалу, а «1» – перехід з низького рівня на високий в середині інтервалу);

- один біт (прикладом цього цифрового кодування є NRZ-L (Non Return to Zero-Level) без повернення до нульового рівня, в якому «0» – це високий рівень, а «1» – низький рівень, а аналогового – частотна маніпуляція, при якій два двійкових числа подаються сигналами

двох різних частот, які розміщені біля несійної: $s(t) = \begin{cases} A \cos \omega_1 t & \text{"1"} \\ A \cos \omega_2 t & \text{"0"} \end{cases}$, де ω_1 і ω_2 – частоти, які зміщені від несійної ω_c на величини, рівні за модулем, але протилежні за знаком);

– більше одного біта.

Прикладом цього може бути кодування квадратурно-фазового маніпулятора QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying), при якій використовуються зсуви фаз кратні $\pi/2$ [6]:

$$s(t) = \begin{cases} A \cos\left(\omega_c t + \frac{\pi}{4}\right) & \text{"11"} \\ A \cos\left(\omega_c t + \frac{3\pi}{4}\right) & \text{"10"} \\ A \cos\left(\omega_c t + \frac{5\pi}{4}\right) & \text{"00"} \\ A \cos\left(\omega_c t + \frac{7\pi}{4}\right) & \text{"01"} \end{cases} \quad (1)$$

Згідно з формулою (1) кожна сигнальна послідовність представляє вже не один біт, а два біти.

Розглянемо особливості асинхронної та синхронної передачі цифрових даних. Досягнути необхідної синхронності передачі можна двома способами. Перший з них – асинхронна передача. При цьому підході проблема синхронізації усувається за рахунок того, що довгі, неперервні потоки бітів не передаються, передача проводиться посимвольно. Причому, довжина кожного символу складає від п'яти до восьми бітів. Число бітів, що міститься в символі, залежить від системи кодування.

Для представлення символів у вигляді послідовності бітів було розроблено багато систем кодування. Першою із них була азбука Морзе. В наш час широко використовується системою текстового кодування – алфавіт IRA (International Reference Alphabet – міжнародний еталонний алфавіт), який показаний в табл. 1. Кожний символ цієї системи кодування представляється унікальною семибітовою структурою.

Таблиця 1

Алфавіт IRA

							0	0	0	0	1	1	1	1
							0	0	1	1	0	0	1	1
							0	1	0	1	0	1	0	1
b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1								
			0	0	0	0	NULL	DLE	SP	0	@	P	`	p
			0	0	0	1	SOH	DC1	!	1	A	Q	a	q
			0	0	1	0	STX	DC2	"	2	B	R	b	r
			0	0	1	1	ETX	DC3	#	3	C	S	c	s
			0	1	0	0	EOT	DC4	\$	4	D	T	d	t
			0	1	0	1	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u
			0	1	1	0	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v
			0	1	1	1	BEL	ETB	'	7	G	W	g	w
			1	0	0	0	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
			1	0	0	1	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
			1	0	1	0	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z
			1	0	1	1	VT	ESC	+	;	K	[	k	{
			1	1	0	0	FF	IS4	,	<	L	\	l	|
			1	1	0	1	CR	IS3	~	=	M	]	m	}
			1	1	1	0	SO	IS2	.	>	N	^	n	~
			1	1	1	1	SI	IS1	/	?	O	-	o	DEL

Американська версія цього алфавіту називається ASCII (American Standart Code for Informational Interchange – американський стандартний код для обміну інформацією). Відповідно ця система дозволяє представити 128 різних символів. Це більше, ніж потрібно, тому деякі набори бітів представляють різні управляючі символи (табл. 2).

Таблиця 2

Управляючі символи алфавіту IRA

1. Управління форматом	
1. BS: Backspace – повертає на одну позицію;	4. VT: Vertical Tab – вертикальна табуляція;
2. HT: Horizontal Tab – горизонтальна табуляція;	5. FF: Form Feed – подача сторінки;
3. LF: Line Feed – подача рядків;	6. CR: Carriage Return – повернення каретки.
2. Управління передачею	
1. SOH: Start of Heading – початок заголовка;	6. ACK: Acknowledge – підтвердження;
2. STX: Start os Text – початок тексту;	7. NAK: Negative Acknowledge – від’ємне підтвердження;
3. ETX: End of Text – кінець тексту;	8. SYN: Synchronous (Idle – синхронний) незадіяний;
4. EOT: End of Transmission – кінець передачі;	9. ETB: End of Transmission Block – кінець передаваного блоку.
5. ENQ: Enquiry – запит;	
3. Розділові символи	
1. IS4: Символ розділення файлів;	Розділові символи використовуються довільно, за виключенням тих ситуацій, коли найвищу ієрархію має символ IS4 (найбільш вмістивий), а найменшу – IS1 (найменш вмістивий).
2. IS3: Символ розділення групи;	
3. IS2: Символ розділення записів;	
4. IS1: Символ розділення модулів.	
4. Додаткові дії	
1. NUL: Null – нуль;	8. DC1, DC2, DC3, DC4: Device Controls – засоби управління пристроями;
2. BEL: Bell – дзвінок;	9. CAN: Cancel – відміна;
3. SO: Shift Out – верхній регістр;	10. EM: End of Medium – кінець середовища;
4. SI: Shift In – нижній регістр;	11. SUB: Substitute – заміщення;
5. DEL: Delete – видалення;	12. ESC: Escape – перехід.
6. SP: Space – пробіл;	
7. DLE: Date Link Escape – зміна каналу даних;	

Деякі із цих керуючих символів контролюють виведення символів на сторінку. Інші зв’язані із процедурами зв’язку. Слід відмітити, що для зберігання і передачі даних, закодованих за допомогою алфавіту IRA, практично завжди виділяється 8 біт на символ [7].

Такий восьмибітовий блок називають октетом або байтом. Додатковий восьмий біт є контрольним і використовується для виявлення помилок. Значення цього біта вибирається таким, щоб загальна кількість двійкових знаків 1 в кожному октеті була непарною (від’ємна парність) або парною (позитивна парність), що дозволяє виявити помилки передачі, які приводять до зміни окремого біта або непарного числа бітів.

Крім кодування IRA, яка містить 7 біт, також широке розповсюдження отримало кодування EBCDIC (Extended Binary Coded Interchange Code – розширене двійкове кодування). Це уже восьми бітове кодування застосовується у всіх машинах категорії VBM, за виключенням персональних комп’ютерів і робочих станцій.

Методи синхронної та асинхронної передачі даних в каналах зв’язку

При асинхронній передачі синхронізація повинна підтримуватися тільки в межах кожного символу, так як приймач має можливість відновлення синхронності на початку кожного нового символу.

Даний метод представлений на рис. 1. Якщо у будь-який момент часу жоден символ не передається, то лінія зв’язку між приймачем і передавачем знаходиться в холостому стані. Визначення холостого стану еквівалентно визначенню сигнального елемента, що представляє двійкову одиницю. Відповідно, для передачі сигналів в кодуванні NRZ-L, яка використо-

вусться при асинхронній передачі, на холостий стан буде вказувати від'ємний рівень напруги в лінії. На початок символу вказує стартовий біт, який вже має значення двійкового нуля. Далше іде 5–8 біт, що по суті складає символ.

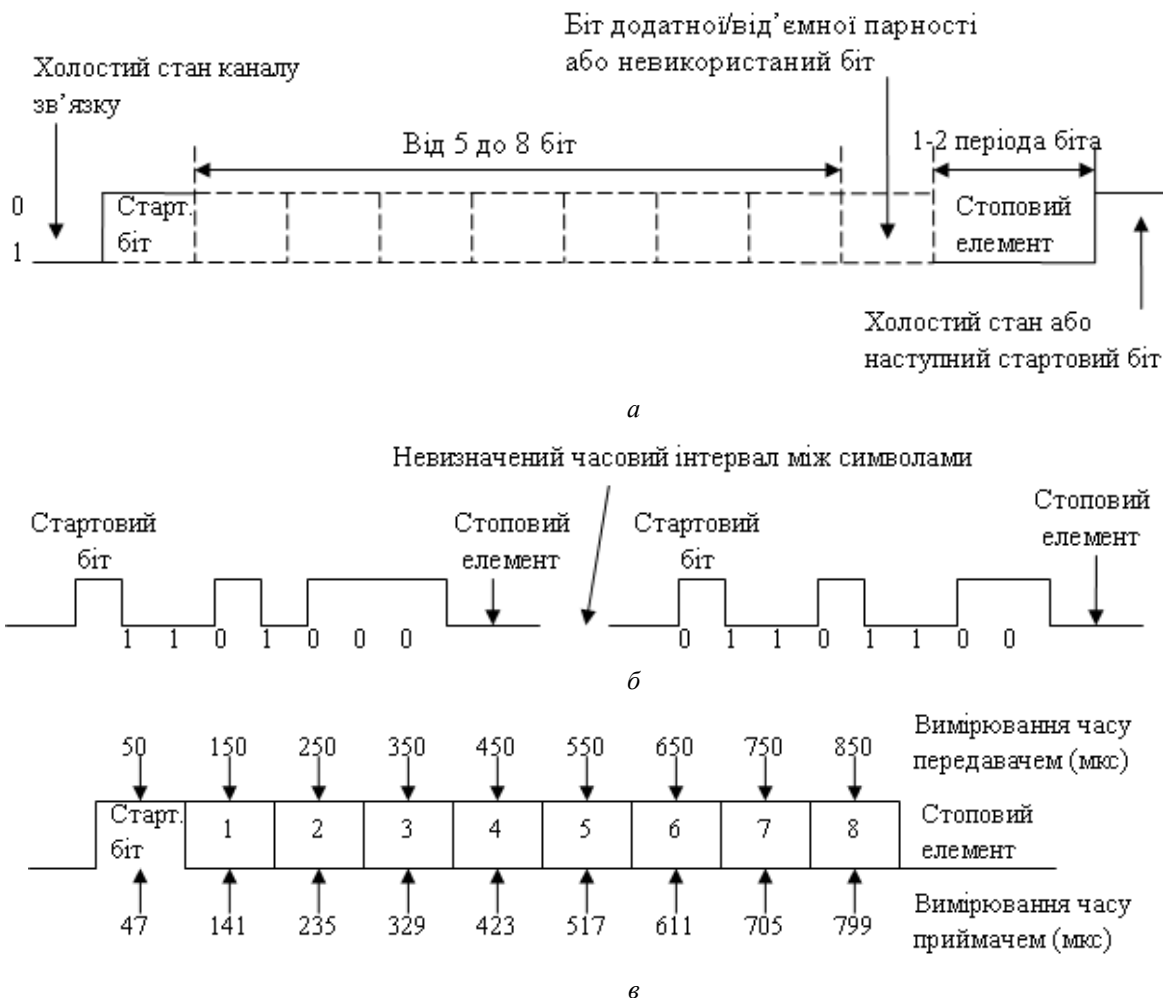


Рис. 1. Асинхронна передача цифрових даних: а – формат символу; б – асинхронний потік символів по 8 біт; в – результат помилки синхронізації

Біти символу передаються послідовно, починаючи із найменш значущого розряду. Наприклад, для символів в кодуванні IRA першим передаючим бітом буде біт, який помічений як b1 в табл. 1. За бітами даних іде, як правило, біт парності, який знаходиться вже в самому значущому розряді. Значення біта парності передавач вибирається так, щоб повне число одиниць в символі, враховуючи біт парності, було парним (додатна парність) або непарним (від'ємна парність). Цей біт парності використовується приймачем для виявлення помилок.

Останній елемент – стоповий, який є двійковою одиницею. Мінімальна тривалість цього елемента складає 1–2 періоди біта. Так як стоповий елемент і холостий стан позначаються однаково, то передавач буде продовжувати передачу стопового елемента, поки не буде готовий до передачі наступного символу.

Вимоги до синхронності даної схеми є дещо обмеженими. Наприклад, символи в кодуванні IRA зазвичай передаються у вигляді восьми бітових блоків, вимагаючи біт парності. Якщо приймач на 5 % швидший чи повільніший передавача, то час вибірки восьмого біта символу буде зміщено вже на 45 %, але вибірка все ще буде проведена правильно. На рис. 1, в показано, як значна помилка при синхронізації приводить до помилки в прийманні даних. В даному прикладі допускається, що швидкість передачі даних була 10 кбіт/с. Тоді,

відповідно, тривалість кожного біта буде рівною $0,1 \text{ мс} = 100 \text{ мкс}$. Тепер припустимо, що приймач працює швидше на 6 % або спішить на 6 мкс на кожний період передачі біта символу. В цьому випадку приймач проводить вибірки поступаючих символів кожні 94 мкс (за часом передавача). Із рисунка видно, що остання вибірка є помилковою.

Помилка, подібна даній, в дійсності породжує зразу дві помилки. По перше, останній вибраний біт приймається неправильно. По друге, може збитися лічильник бітів. Якщо сьомим бітом була «1», а восьмим – «0», то восьмий біт помилково може бути прийнятий за стартовий біт. Така ситуація кваліфікується помилкою кадрування, так як символ разом із стартовим бітом та стоповим елементом називають кадром. Помилка кадрування також може виникнути у випадку появи помилкового, викликаного завадами, стартового біта під час холостого стану.

Хоча асинхронна передача проста і дешева, вона вимагає передачі двох-трьох зайвих бітів на символ. Якщо, наприклад, передається восьмий бітовий символ, що не містить біта парності, то при одно бітовому стоповому елементі два із кожних десяти бітів не несуть інформації, а використовуються лише для синхронізації передачі цифрових даних. Відповідно 20 % інформації є надлишковою, службовою. При збільшенні блоку, що передається, сумарна помилка синхронізації також зростає. Тому для збільшення ефективності передачі використовують синхронну передачу цифрових даних.

При синхронній передачі блок бітів передається у вигляді неперервного потоку без символів початку і кінця блоку [5]. Сам блок вже може складатися з необмеженої кількості бітів. Для запобігання втрати синхронності між передавачем і приймачем їх тактові генератори повинні бути певним чином синхронізовані. Один із можливих варіантів – це створення лінії синхроімпульсів між приймачем і передавачем. Одна сторона – передавач регулярно по лінії посилає імпульси, по одному короткому імпульсу в кожний період передачі біта. Сторона приймання сприймає ці імпульси, як сигнали точного часу. Цей метод добре працює на коротких відстанях, а на великих відстанях такі синхроімпульси спотворюються, як й інформаційні, що веде до зростання помилки синхронізації. Другим більш надійним варіантом є вкладання синхронізуючої інформації в інформаційний сигнал. Для цифрових сигналів це можна виконати, вибравши манчестерське або диференціальне манчестерське кодування [7]. Для аналогових сигналів можна вибрати інші способи: для синхронізації може бути використана несійна частота, за фазою якої синхронізується приймач [8 – 11].

При синхронній передачі вимагається інший рівень синхронізації, який би дозволив приймачу визначати початок і кінець блоку даних. Для отримання подібної синхронності кожен блок починається з деякої послідовності бітів – преамбули, а закінчується послідовністю, яку називають завершенням. Крім цього до блоку доставляються інші біти, які несуть керуючу інформацію, що використовується в процедурах управління каналом зв'язку. Цифрові дані разом з преамбулою і завершенням, а також з керуючою інформацією, називають кадром. Формат кадра визначається процедурою управління каналом зв'язку. На рис. 2. показаний типовий формат кадру при синхронній передачі. Зазвичай, кадр починається із восьмибітової преамбули, яку називають прапорцем. Цей же прапорець використовується і як завершення. Приймач очікує появу прапорця і сприймає його як початок кадру. Після цього іде декілька інформаційних полів, поле даних, а завершується кадр повторенням прапорця.

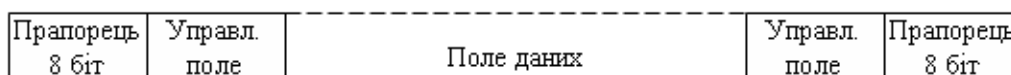


Рис. 2. Формат синхронного кадру цифрових даних

Тому при передачі великого масиву даних синхронна передача є значно ефективнішою асинхронної. При застосуванні асинхронної передачі даних службова інформація складає

20 % і більше. В синхронній передачі цифрових даних на преамбулу і завершення витрачається не більше 100 біт. Так, для важливого протоколу управління каналом зв'язку HDLC (High-level Data Link Control – високорівневий протокол управління каналом, стандарти ISO 3009, ISO 4335), преамбула, завершення та керуюча інформація займає лише 18 біт. Тому блок, що містить 1000 символів або $1000 \cdot 8 = 8$ кбіт цифрових даних, буде мати лише 48 біт службової інформації, що складає всього $48/8048 \cdot 100 \% = 0,6 \%$.

Конфігурація лінії каналу зв'язку

Розглянемо конфігурацію лінії каналу зв'язку. Конфігурацію ліній розрізняють за двома характеристиками: топологією і обміном. Топологія лінії зв'язку – це фізичне розміщення станцій в передаючому середовищі. При наявності тільки двох станцій лінія зв'язку стає двоточковою. Якщо станцій більше двох, то ми отримуємо вже багатоточкову топологію. Багатоточкова лінія зв'язку використовується при наявності сервера (головної станції) та набору терміналів (підпорядкованих станцій). Така топологія, як правило, використовується в локальних мережах.

Всі методи інформаційного обміну по лініям зв'язку можна розділити на дуплексні та півдуплексні [4]. При півдуплексній передачі в кожний момент часу може передавати тільки одна з двох станцій двоточнової лінії. Цей режим передачі ще називають двосторонньою по черговою передачею.

При дуплексній передачі дві станції можуть вже одночасно посилати і отримувати дані одна від одної. Для інформаційного обміну між двома ПК ця форма передачі є більш ефективною, ніж півдуплексна передача.

Більшість цифрових пристроїв обробки даних мають обмежені передавальні можливості. Зазвичай ці пристрої генерують простий цифровий сигнал, наприклад сигнал в кодуванні NRZL, і можуть передавати дані на обмеженій відстані. Тому такий пристрій (ПК чи термінал) не часто прямо зв'язують із засобами передачі даних або з роботою мережі. Для цього використовують пристрої спряження ліній передачі. Тому ПК і термінали називають термінальним обладнанням (DTE – Data Terminal Equipment), а пристрої спряження цього обладнання з лініями називають обладнанням передачі даних (DCE – Data Circuit-Terminating Equipment). Роль пристроїв спряження виконують цифрові модеми. Взаємодія між пристроями DTE та DCE здійснюється через так звані кола обміну (інтерфейси). Такі інтерфейси мають 4 важливі групи характеристик: механічні; електричні; функціональні та процедурні.

Механічні характеристики описують реальні фізичні з'єднання між пристроями DTE і DCE у вигляді рознімачів. Електричні характеристики описують рівні напруг та часові параметри зміни напруг. Ці характеристики визначають можливі швидкості передачі даних і відстані передач.

Функціональні характеристики вказують функції, які виконуються шляхом надання кожному колу обміну визначеного значення. Ці функції можна розділити на інформаційні, управляючі, синхронізуючі та задаючі. Процедурні характеристики задають послідовність дій при передачі даних, яка оснований на функціональних характеристиках інтерфейсу.

Є багато варіантів спряження. В даній статті розглянуто два найбільш важливих: V.24/EIA-232F та ISDN. Інтерфейс V.24 описаний в стандарті ITU-T, і випущений Асоціацією електронної промисловості США (EIA – Electronic Industries Alliance). Даний інтерфейс передбачає використання 25 – контактного рознімача, який визначається стандартом ISO 2110.

Велике число функцій інтерфейсу V.24/EIA-232F досягається за рахунок використання великої кількості кіл обміну. Такий спосіб отримання результатів є достатньо дорогим. Тому існує альтернативний підхід: зменшити кількість кіл, але внести в інтерфейси пристроїв DTE і DCE додаткову логіку. Така тенденція була закладена в специфікації восьмиконтактного фізичного рознімача для цифрової мережі з інтеграцією послуг (ISDN – Integrated Services Digital Network). Мережа ISDN представляє собою повністю цифрове заміщення існуючих

телефонних і аналогових телекомунікаційних мереж. В термінології ISDN фізичне з'єднання організується між термінальним обладнанням (TE – Terminal Equipment) і обладнанням завершення мережі (NT – Network-terminating Equipment). Згідно стандарту ISO8877, для організації фізичного з'єднання між пристроями TE і NT кабелі повинні закінчуватися восьмиконтактними рознімачами.

Електрична специфікація мережі ISDN передбачає використання збалансованої передачі. При збалансованій передачі сигнали передаються по лінії у вигляді витой пари. Сигнали передаються у вигляді струму, що проходить по одному провіднику та повертається по другому, при цьому обидва утворюють замкнуте коло.

Для прикладу розглянемо організацію цифрових каналів зв'язку елементів приймально-го комплексу системи передачі інформації (СПІ) з використанням модемів ZyXEL серії U-336 (модемів для фізичної лінії Nokia і Zelax) сумісно з мультиплексорами фірми RAD серії STM (STM-4, STM-8, STM-8HS, STM-16HS).

В ролі елементів приймального комплексу виступають в даній СПІ наступні пристрої:

- комп'ютер АРМ ДПП (автоматизоване робоче місце дуплексного передаючого-приймального пристрою) СПІ, де цифровий канал використовують для зв'язку з віддаленим КЩО (комп'ютером цифрової обробки) СПІ;

- КЩО СПІ, де цифровий канал використовують для зв'язку з АРМ ДПП, а також для зв'язку з другим віддаленим КЩО або віддаленим терміналом (ВТ) СПІ;

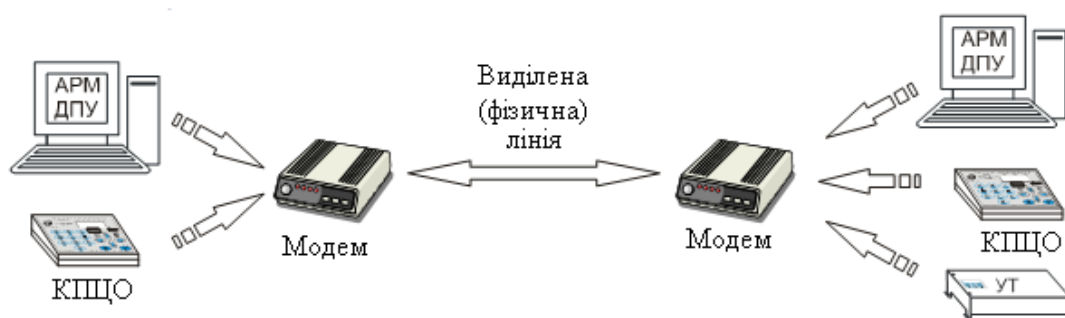
- ВТ СПІ, де цифровий канал використовують для зв'язку з АРМ ДПП або КЩО СПІ.

Такі варіанти передачі інформації з використанням цифрового каналу зв'язку подані на рис. 3. У всіх цих варіантах ставиться задача отримання повністю «прозорого» каналу зв'язку між парою пристроїв (АРМ ДПП, КЩО чи ВТ СПІ), тобто каналу, який не вносить спотворень і обмежень в цифровий потік даних. Це дає можливість проводити незалежне тестування.

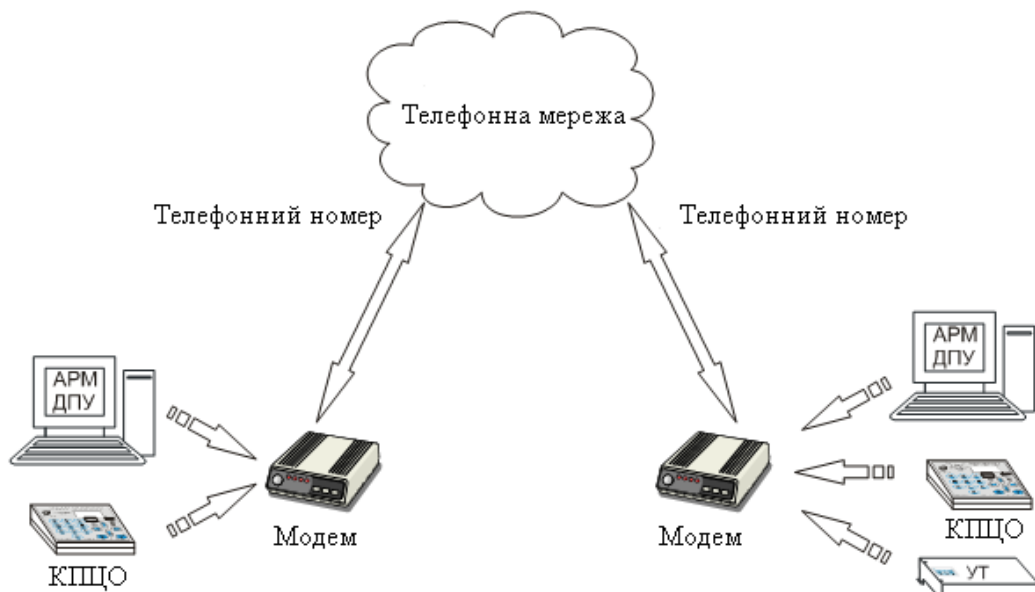
В даній системі для організації цифрових каналів використовують наступні схеми (рис. 3):

- 1) пряме з'єднання пристроїв з використанням виділеної фізичної лінії зв'язку (рис. 3, а);
- 2) пряме з'єднання пристроїв з використанням комутуючого пристрою (рис. 3, б);
- 3) пряме з'єднання пристроїв з використанням виділеної фізичної лінії з автоматичним переключенням на комутуючу лінію при двох виділеннях (рис. 3, в);
- 4) багатоканальне з'єднання з використанням виділеної фізичної лінії зв'язку (рис. 3, г);
- 5) багатоканальне з'єднання з використанням комутуючого з'єднання (рис. 3, д);
- 6) багатоканальне з'єднання з використанням виділеної фізичної лінії зв'язку з автоматичним переключенням на комутуючу лінію при обриві виділеної (рис. 3, ж);

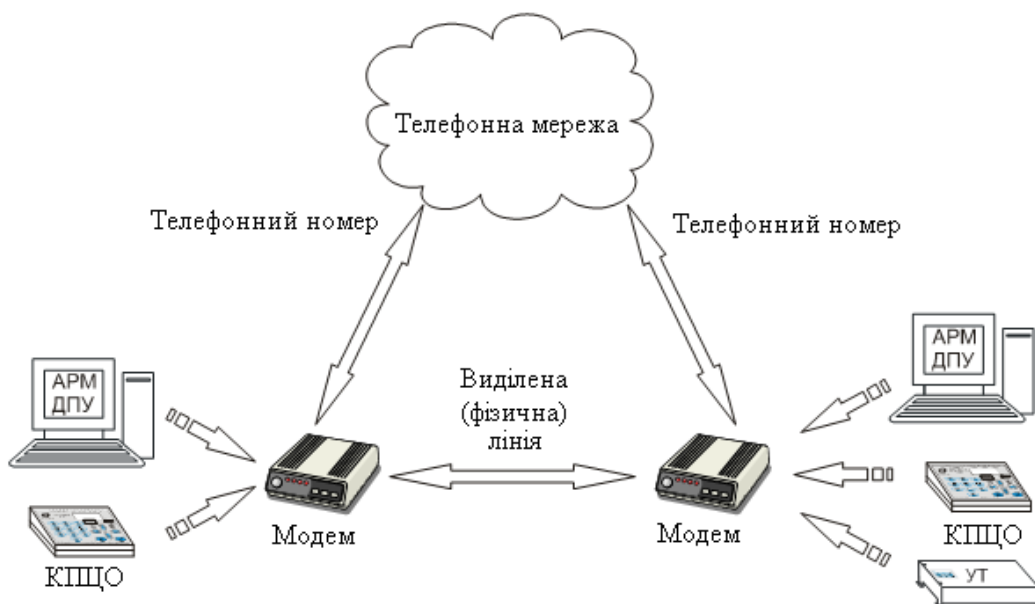
Вибір конкретної схеми організації зв'язку залежить від наявності ліній зв'язку, кількості каналів, які необхідно організувати.



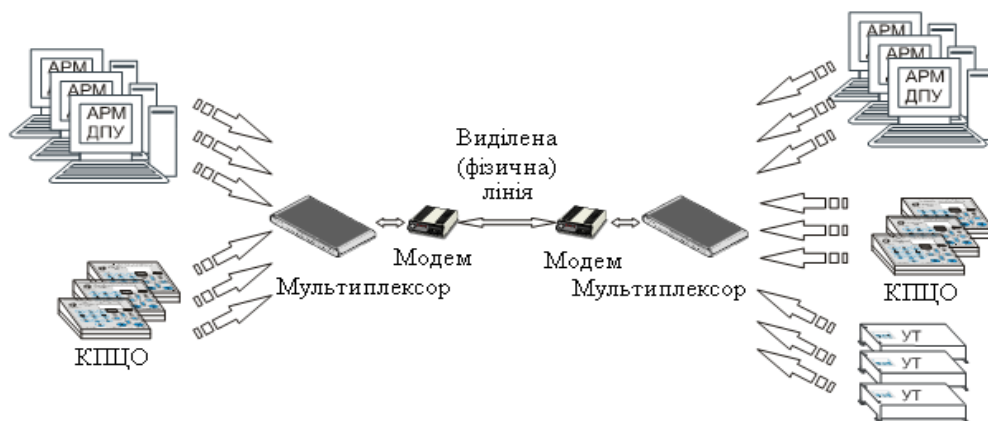
а



б



в



г

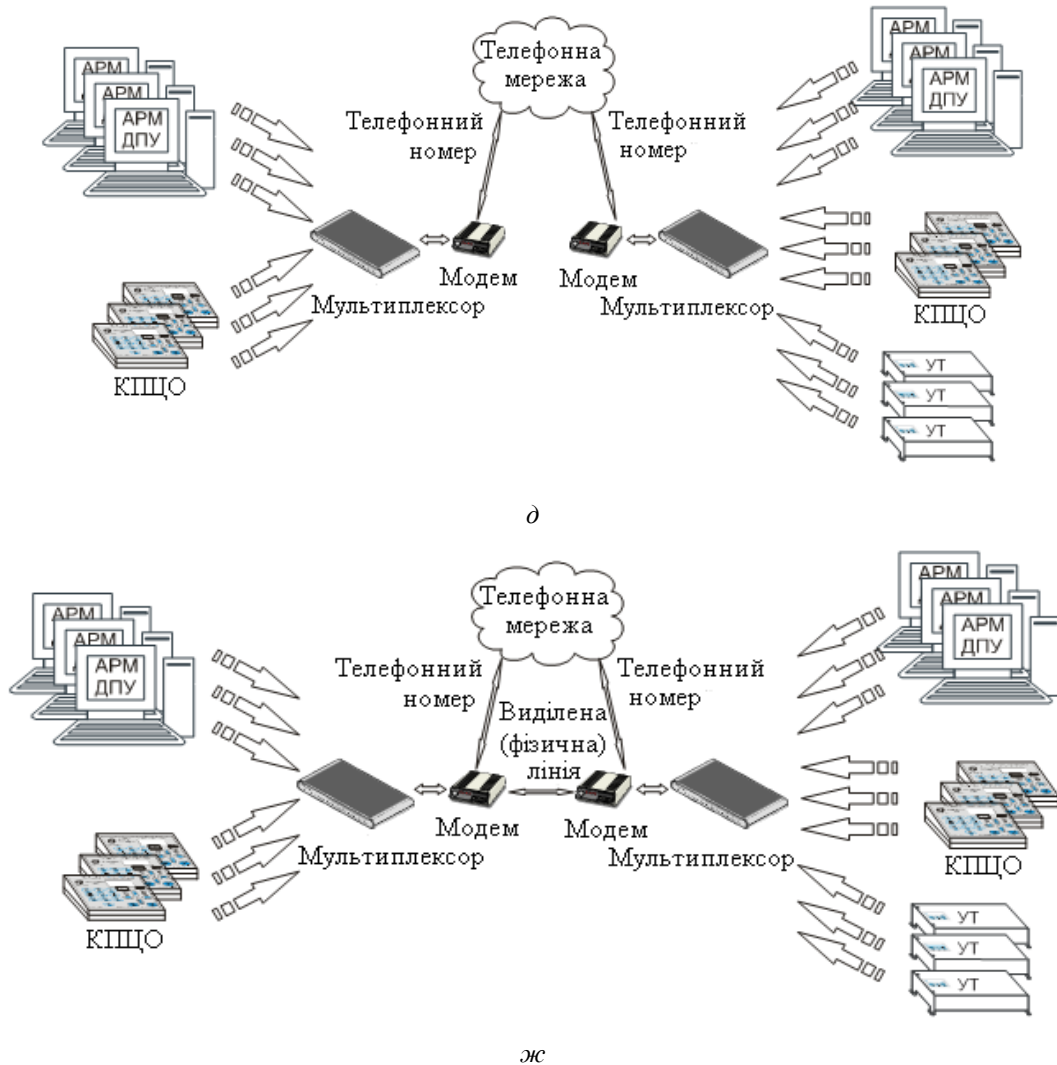


Рис. 3. Варіанти передачі цифрової інформації з використанням цифрового каналу зв'язку

Програмування модемів та мультиплексорів

При програмуванні модемів (незалежно від типу модему), а також мультиплексорів (при використанні схем рис. 3, г, д, ж) необхідно провести налаштування пристроїв з врахуванням наступних умов:

1. Тип каналу зв'язку для використаного обладнання (пристроїв DTE):

1) кількість біт даних, що передаються (всі пристрої СПІ використовують 8-бітовий формат даних);

2) наявність або відсутність контролю парності (непарності) передаючих бітів (всі пристрої СПІ не використовують контроль парності (непарності));

3) наявність або відсутність програмного або апаратного управління потоком даних, які передаються (всі пристрої системи СПІ не використовують управління потоком даних).

4) швидкість обладнання DTE (пристроїв приймального комплексу або мультиплексорів) встановлюється модемами (для прямого зв'язку, що задається схемами рис. 3, а, б, в, рекомендується задавати швидкість 4800 біт, а для зв'язку мультиплексорів доцільно вибирати вже швидкість, яка встановлюється для основного каналу мультиплексора);

5) тип синхронізації в каналі DTE (для схем рис. 3, а, б, в використовують асинхронний режим, а для схем з багатоканальним з'єднанням пристроїв рис. 3, г, д, ж використовують вже синхронний режим роботи).

2. Тип протоколу і швидкість, які використовують модеми для зв'язку один з одним:

1) тип протоколу визначається можливостями модему і вимагає набір протоколів ущільнення та відновлення помилок при передачі;

2) швидкість з'єднання може відрізнятись від швидкості, яка встановлюється для обладнання DTE (вибирають рівну, або більшу за швидкість каналу DTE).

3. Режим утворення каналу зв'язку:

1) тип з'єднання: комутуюче, або виділене і залежить від типу вибраних модемів;

2) роль модему в парі (всі параметри налаштування співпадають).

Процедура програмування модему залежить від його типу. Для модемів ZyXEL програмування проводиться з використанням ПК через термінальну програму. Програма налаштування модему складається із ряду пунктів ініціалізації і для кожного модему задаються окремою програмою. Модеми для фізичних ліній програмуються, як правило, з використанням вмонтованої клавіатури та індикатора (Nokia, Zelax), або шляхом встановлення певних перемичок (закороток) і задаються схемою модему.

Аналогічно модему для схем рис. 3, з, д, ж розглянуто також основні принципи програмування мультиплексорів RAD для організації багатоканальної системи передачі даних.

Мультиплексори RAD серії STM відносяться до класу статичних мультиплексорів і дозволяють проводити передачу даних декількох асинхронних дуплексних каналів по одному синхронному дуплексному каналу. В залежності від моделі мультиплексори серії STM мають від 2 до 24 асинхронних канали (суб-канали) і один основний (main-канал). З'єднання суб-каналів пари мультиплексорів проходить статичним чином, тобто першому суб-каналу одного мультиплексора відповідає перший суб-канал другого, другий – другому і тому подібне. Для з'єднання мультиплексорів між собою використовують синхронний режим (дуплексний канал), для організації якого використовують будь-яке термінальне обладнання. Основні принципи програмування пари модемів ZyXEL U-336 з використанням мультиплексорів RAD є наступні:

Кожний суб-канал повинен бути налаштований на параметри даних, які передаються:

1) Band Rate – швидкість роботи каналу, вибирається із ряду: 38400; 19200; 9600; 4800; 2400; 1200; 600; 300; 150; 110; 75 біт/с (як правило вибирають 4800 біт/с);

2) Data Bits 5/6/7/8 – число бітів в передавальних байтах і вибирається із ряду: 5; 6; 7; 8 (як правило, вибирають 8 біт/с);

3) Parity Even/Odd/Space/Mark/None – режим роботи системи контролю парності (як правило, вибирають None – без контролю);

4) Stop bits 1/1,5/2 – число стоп-бітів (вибирають 1 стоп-біт);

5) STM to DTE Software flow control on/off – режим контролю потоку даних із сторони мультиплексора (вибирають None – без контролю);

6) END to END Software control on/off – режим контролю даних по управляючим символам;

7) END to END Software control on/off – режим контролю даних із сторони обладнання (вибирають None);

8) RTS Control PASS on/off – режим контролю даних по апаратним лініям (вибирають, як правило, NONE).

Програмування режимів роботи MU здійснюється за допомогою термінальної програми аналогічно як для модему. Для програмування необхідно підключити термінальну програму до любого порту суб-канала MU за допомогою інтерфейсного кабелю «DB9M-RJ45». Після підключення інтерфейсного кабелю необхідно провести перезапуск мультиплексора, повернувши перемичку INIT/NORM в положення NORM, а потім ввести послідовність символів @@@@S, роблячи між символами паузу не менше 1 с. В даному діалозі ввести пароль для доступу до налаштування мультиплексора (пароль RD). Далі в розділі «2) configure local channel» необхідно послідовно провести налаштування режимів роботи усіх локальних каналів. Для використання MU доцільно ввести налаштування наступного виду:

1) 4800; 2) 8; 3) NONE; 4) 15; 5) OFF; 6) OFF; 7) OFF; 8) OFF.

Після закінчення вийти із меню налаштування MU.

Для індикації свого стану MU використовує світлодіодні індикатори, які розміщені на передній панелі. Індикатори, які розміщені над портами суб-каналів служать для індикації активності передачі даних по кожному каналу. Індикатор MAIN вказує на активність MAIN-каналу MU і його рівня та пульсуюче світіння разом із свіченням індикатора SYNC вказує на наявність зв'язку між мультиплексорами. А індикатори ERROR і OVF вказують на наявність помилки при передачі даних між суб-каналами. Якщо в процесі роботи індикатор SYNC переходить в миготливий режим, то це вказує на втрату синхронізації між MU і вказує на збій роботи основного каналу.

Висновки

Проведено огляд та аналіз основних способів кодування при синхронній та асинхронній передачі даних. Показано приклад кодування двох бітів інформації при застосуванні квадратурно-фазового маніпулятора. Проаналізовано систему текстового кодування (IRA) та американський стандартний код для обміну інформацією (ASCII). Розглянуто основні методи передачі даних в синхронному та асинхронному режимі. Визначено їх основні характеристики та недоліки при застосуванні в інтерфейсах передачі даних в комп'ютерних системах. Це показано на прикладі аналізу системи передачі інформації з повним описом використовуємого обладнання та деталізацією особливостей використання. Наведено основні принципи програмування модемів та мультиплексорів при передачі цифрової інформації з використанням цифрового каналу зв'язку для можливих варіантів конфігурації системи передачі інформації.

Список літератури:

1. Парамуд Я.С. Периферійні пристрої, інтерфейси та драйвери : навч. посіб. Львів : Магнолія 2006, 2023. 210 с.
2. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П.Л., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі. Кн. 1 : навч. посіб. Львів : Магнолія 2006, 2013. 256 с.
3. Азаров О. Д., Захарченко С. М., Кадук О. В. та ін. Комп'ютерні мережі : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2013. 371 с.
4. Безрук В.М., Бідний Ю.М., Колтун Ю.М., Астраханцев А.А., Свид І.В., Ширяєв А.В., Харченко Н.А. Інформаційні мережі зв'язку. Ч. 2 // Телекомунікаційні технології стаціонарних мереж зв'язку : навч. посіб. Харків : ХНУРЕ, 2011. 492 с.
5. Sheikholeslami M. and Li Z. Data Communication Interfaces in Smart Grid Real-time Simulations: Challenges and Solutions // 2021 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm). Aachen, Germany, 2021. P. 295–300. doi: 10.1109/SmartGridComm51999.2021.9632324.
6. Zhang M. and Xu Q. Research on Communication Channel Modeling of Balise Control Interface // 2021 IEEE International Conference on Computer Science, Electronic Information Engineering and Intelligent Control Technology (CEI). Fuzhou, China, 2021. P. 720–723. doi: 10.1109/CEI52496.2021.9574506.
7. Wang C., Xu J., Feng X., Wu W. and Wang J. Database Interface Application Based on ODBC Development // 2022 2nd Asia-Pacific Conference on Communications Technology and Computer Science (ACCTCS). Shenyang, China, 2022. P. 362–365. doi: 10.1109/ACCTCS53867.2022.00080.
8. Nyckolaychuk Y., Grynchychyn T., Pitukh I., Petraschuk Y., Nyckolaychuk L., Hryha V. Promising Developments in Cyber Physical System Tools For Background Monitoring of Reserve Landscape // Advanced Computer Information Technologies. International Conference. ACIT 2021. Degendorf, Germany, September 2021. P. 686–690.
9. Свид І.В., Обод А.І. Інформаційні технології обробки даних систем спостереження // Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава : Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2016. Вип. 4 (40). С. 91–93.
10. Оцінка відносної пропускну здатності запитальних систем спостереження повітряного простору / М.Г. Ткач, І.В. Свид, О.В. Воргуль, С.В. Старокожев, О.С. Мальцев, А.О. Глущенко // Радіотехніка 2022. Вип. 208. С. 28–37. doi: <https://doi.org/10.30837/rt.2022.1.208.03>.
11. Novosiadlyi S., Gryga V., Lukovkin V. and Mandzyuk V. Simulation of Frequency Properties of Operational Amplifiers in Analog-Digital Signal Processing Devices // 2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Ceske Budejovice, Czech Republic, 2019. P. 209–212. doi: 10.1109/ACITT.2019.8779868.

Надійшла до редколегії 02.12.2024

Відомості про авторів:

Довгий Віктор Володимирович – канд. техн. наук, Прикарпатський національний технічний університет імені Василя Стефаника, старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Україна, e-mail: viktor.dovhyi@pnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7158-6938>

Терлецький Андрій Іванович – канд. фіз-мат. наук, доцент, Прикарпатський національний технічний університет імені Василя Стефаника, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Україна, e-mail: andrii.terletsnyi@pnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1667-3467>

Грига Володимир Михайлович – канд. техн. наук, доцент, Прикарпатський національний технічний університет імені Василя Стефаника, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Україна, e-mail: volodymyr.gryga@pnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5458-525X>

Свид Ірина Вікторівна – канд. техн. наук, доцент, Прикарпатський національний технічний університет імені Василя Стефаника, професор кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Україна, e-mail: iryna.svyd@pnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4635-6542>].

RELATED PROBLEMS OF RADIO ENGINEERING СУМІЖНІ ПРОБЛЕМИ РАДІОТЕХНІКИ

УДК 37.046

DOI:10.30837/rt.2024.4.219.13

А.В. БІЗЮК, канд. техн. наук, Н.Г. ЗМІЇВСЬКА

НАПРЯМИ ВПРОВАДЖЕННЯ ГРАФІЧНОГО СТИЛЮ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ В ДИЗАЙН ЕЛЕКТРОННОГО МУЛЬТИМЕДІЙНОГО НАВЧАЛЬНОГО ПОСІБНИКА З ТАКТИЧНОЇ ПІДГОТОВКИ

Вступ

Важливим рішенням у сфері підвищення ефективності навчання курсантів (студентів) вищих військових навчальних закладів і військових підрозділів закладів вищої освіти з тактичної підготовки є діяльність щодо створення електронних мультимедійних навчальних видань та електронних освітніх ресурсів [1]. Завдяки їх мультимедійності та інтерактивності забезпечується максимальна активізація усіх видів діяльності курсанта (студента), прискорюючи процес розуміння навчального матеріалу та сприяючи підвищенню ефективності його засвоєння.

Не останню роль при розробці електронного мультимедійного навчального видання з тактичної підготовки займає проектування дизайну, основними вимогами до якого є відповідність тематиці навчальної дисципліни та особливостям цільової аудиторії.

При цьому повно та беззастережно мають бути враховані графічний стиль Збройних Сил України (кольори, шрифти, логотипи), базові візуальні рішення, котрі впливають на реалізацію комунікаційних цілей Збройних Сил України, сприяють розвитку і зміцненню їх бренду, підвищенню рейтингу довіри в суспільстві та міжнародному середовищі [2].

Вимоги щодо дотримання графічного стилю розповсюджуються на ділову поліграфію, друковану продукцію, електронні ресурси, матеріали для соціальних мереж, фото-, відеоматеріали та ін.

Цими ж вимогами, виходячи з асоціації кольорів виключно зі Збройними Силами України, його видами та Силами, регламентується використання в усіх видах зазначеної продукції (ресурсів) єдиних кольорів для цих структурних формувань. Так, наприклад, для Збройних Сил України – колір «Мундир», для Сухопутних військ – «Степ», для Повітряних Сил – «Грозове небо». При цьому передбачається тільки однотонна заливка сторінок.

Такий підхід ускладнює створення сучасного дизайну електронного навчального видання з тактичної підготовки з точки зору кольорової гами.

По-перше, досить складно викликати асоціацію з різноманітним тактичним діям на однотонному фоні. По-друге, не всі графічні об'єкти, пов'язані з цією тематикою, будуть гармонійно виглядати на екрані видання, фоном якого є, наприклад, однотонний колір «Мундир» або «Степ».

Крім того, не в повній мірі такий дизайн відповідає й особливостям цільової аудиторії, якою є молодь – курсанти (студенти), переважно чоловічої статі [3]. Відмінною рисою такої аудиторії є прагнення до всього нового, у силу відсутності досвіду – схильність до максималізму, перебільшення значення власної думки. Ураховуючи прагнення до всього нового та схильність до максималізму, молодь сьогодні обирає контент, який володіє художньою й естетичною цінністю і є джерелом нових знань, емоцій чи вражень [4]. Офіційні ж кольори Збройних Сил України уособлюють простоту, історичність і стриманість.

Виникає проблема і з впровадження графічного стилю Збройних Сил України в дизайн електронного мультимедійного навчального видання, пов'язана з тим, що керівництвом [2] передбачається використання тільки одного (базового) шрифту UAF Sans для всіх видів носіїв, а досягнути контрасту, виділити необхідну інформацію у такому випадку досить складно. Крім того, шрифт UAF Sans не передбачає курсиву, що теж потребує вирішення.

Отже, метою статті є пошук шляхів вирішення проблем впровадження графічного стилю у військовій комунікації Збройних Сил України в дизайн електронного мультимедійного навчального видання з тактичної підготовки.

Основний матеріал досліджень

Зазначені проблеми були виявлені при проєктуванні дизайну електронного мультимедійного навчального посібника «Тактична підготовка (механізоване відділення)» за допомогою програми Figma, замовником якого є кафедра підготовки офіцерів запасу Військово-юридичного інституту Національного юридичного університету імені Ярослава Мудрого.

При первинному обранні кольорової гами екранів використовувався загальноприйнятий підхід орієнтування на особливості тематики та інтереси цільової аудиторії [5 – 8] без урахування вимог керівництва [2].

У якості фону екранів (сторінок) обрано колір польової військової форми «Піксель» (камуфляжне забарвлення із комбінації плям відтінків зеленого (захисного), сірого і коричневого кольорів), який по замислу мав символізувати польові умови, суто військову роботу – ведення бою, що є предметом тактичної підготовки (рис. 1).



Рис. 1. Ескіз головного екрану електронного мультимедійного навчального посібника «Тактична підготовка (механізоване відділення)» (варіант 1)

Для виділення заголовків екранів було прийнято рішення створити у верхній частині екрану поле шляхом накладання напівпрозорого шару (фігури прямокутної форми) і отримання ефекту фонового розмиття (матового скла).

Кнопки меню передбачали градієнтну заливку коричневого кольору (темного по контуру і світлого по центру) з анімацією кольорів при підведенні курсору миші.

Використання такої технології для створення кольорової гами, на думку авторів, мало б і максимально приваблювати цільову аудиторію, враховуючи те, що саме емоційне сприйняття визначає потребу курсанта (студента) в таких елементах, які будуть виділятися із сірої маси та порушуватимуть звичний рутинний плин процесу медіаспоживання.

З метою експертного оцінювання якості спроектованого дизайну електронного видання були проведені консультації з членами робочої групи Збройних Сил України з розробки графічного стилю у військовій комунікації Збройних Сил України [2], в ході яких отримано наступні рекомендації:

– для оформлення фону екранів з тематики тактичної підготовки використовувати колір Збройних Сил України «Мундир» або ж колір Сухопутних військ «Степ» (рис. 2);

– для типографіки застосовувати виключно базовий шрифт комунікації Збройних Сил України UAF Sans з його накресленнями Regular, Medium, Semibold, Bold;

– для просування бренду Збройних Сил України використовувати їх символіку – логотипи Збройних Сил України, розташовуючи на екранах (обкладинка, титульний екран з вихідними даними) у відповідності до керівництва [2].

Крім того, на думку робочої групи, піксельний фон на таких матеріалах і взагалі на будь-яких виданнях – це моветон (від фр. *mauvais ton* – поганий тон).

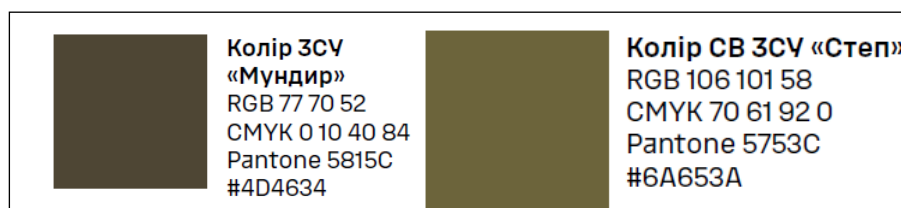


Рис. 2. Кольори «Мундир» і «Степ» в комунікації Збройних Сил України

Отже, постало завдання переробки дизайну видання таким чином, щоб одночасно забезпечити дотримання графічного стилю Збройних Сил України, який уособлює простоту, стильність, історичність і стриманість, і при цьому знайти оригінальні рішення для відображення в дизайні тематики посібника і зацікавлення цільової аудиторії.

Для реалізації цього завдання концепцією створення кольорової гами передбачалося використання для забарвлення фону поля заголовків кольору «Мундир», а для фону екрану – кольору «Степ».

Таке рішення обґрунтовувалося тим, що колір «Мундир» є офіційним кольором Збройних Сил України і символізує все, що пов'язане з військовою справою, обов'язком щодо захисту Батьківщини. У відповідності до колористичної системи RGB він утворюється шляхом змішування трьох кольорів: червоного – 77, зеленого – 70, синього – 52.

Колір же «Степ» є офіційним кольором Сухопутних військ і символізує належність до цього виду збройних сил, первинним підрозділом якого є механізоване відділення, дії котрого розглядаються в посібнику. Крім того, цей колір асоціюється з травою, польовими умовами, полем бою, що відповідає предмету вивчення (рис. 2). Насиченість кольорами по системі RGB складає: червоним – 106, зеленим – 101, синім – 58.

Насиченість кольорами наведена саме згідно з системою RGB, оскільки вона зазвичай використовується при роботі з цифровими носіями (екран телевізора, монітор).

У результаті отримано ескіз екрану (рис. 3), дизайн якого хоча і відповідає як вимогам керівництва [2] та рекомендаціям робочої групи, так, в принципі, і тематиці видання, але, на думку авторів, має дещо сумний, простий і стандартний вигляд (рис. 3).

Не в повній мірі кольорова гама даного варіанту екрану може виконати і завдання з мотивування цільової аудиторії, якою є молодь (курсанти (студенти) переважно чоловічої статі), та вимоги замовника щодо створення сучасного дизайну.



Рис. 3. Ескіз головного екрану електронного мультимедійного навчального посібника «Тактична підготовка (механізоване відділення)» (варіант 2)

Такий висновок зроблено на підставі аналізу досліджень, проведених командою маркетологів і дизайнерів креативної агенції *dissident*, з вивчення психології кольору та її впливу на споживачів [9].

За результатами цих досліджень визначені найпопулярніші кольори серед чоловіків і за віком.

Так, дослідження показали, що чоловіки віддають перевагу синьому кольору, 57 % респондентів обрали його своїм улюбленим. Найменш популярними кольорами серед чоловіків були коричневий (24 %), фіолетовий і помаранчевий (22 %) (рис. 4).

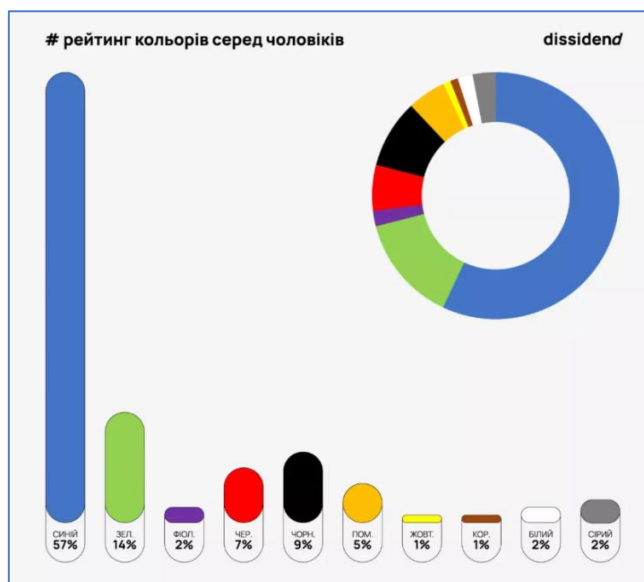


Рис. 4. Рейтинг кольорів серед чоловіків

У результаті досліджень за віком командою встановлено, що молодшу аудиторію найбільше привертають рожевий, жовтий, яскравий синій та кілька інших яскравих відтінків. Опитування молодих людей у віці від 1 до 35 років показало, що багато з них віддають перевагу яскравим кольорам, таким як червоний, помаранчевий та інші. Це через те, що яскраві кольори асоціюються з максималізмом, прагненням до всього нового та енергією. Серед тих, хто віком від 1 до 24 років, загалом коричневий виявився найменш популярним кольором. Не сильно приваблює молодь (від 19 до 24 років) і зелений колір (рис. 5).

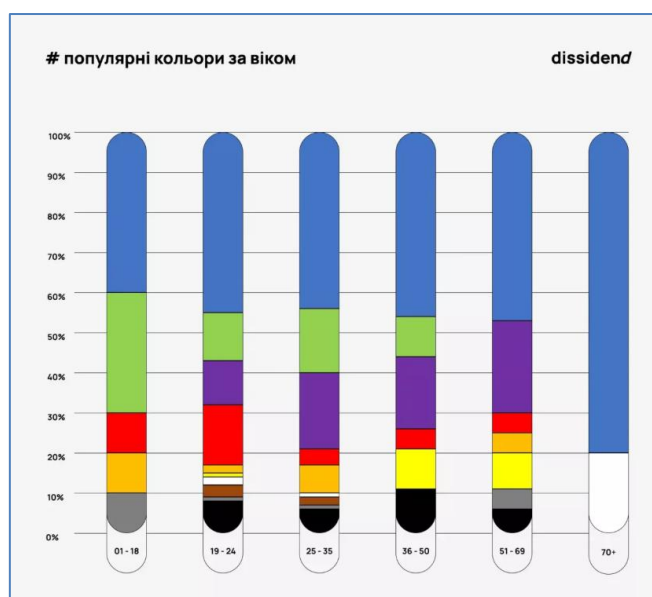


Рис. 5. Рейтинг кольорів за віком

Порівняльний аналіз досліджень, проведених колективом *dissident*, і кольорової гама ескізу головного екрану навчального посібника, що проєктується, показав, що ні кольори, які переважають за насиченістю (інтенсивністю) в кольоровій гамі RGB при створенні кольорів «Мундир» і «Степ» (червоний, зелений), ні наближені до них кольори (до «Мундиру» – коричневий, до «Степу» – зелений), як видно з діаграм, відображених на рис. 4, 5, не користуються популярністю у молоді чоловічої статі.

Таким чином, виникло питання, як змінити кольорову гаму так, щоб оживити дизайн екранів, зробити його більш сучасним, привабливим і оригінальним, при цьому не порушити підходи до графічного стилю у візуальній комунікації Збройних Сил України.

Шляхом розв’язання цієї проблеми стало рішення щодо створення гармонійного сполучення близьких за насиченістю кольорів (створення контрасту за насиченістю) [10] «Мундир» і «Степ» способом радіальної градієнтної заливки фону екрану. Показники насичення за системою RGB наведені на рис. 2.

Радіальний градієнт по еліпсу із кольором «Мундир» по контуру і кольором «Степ» по центру більш вдало, у порівнянні з попереднім варіантом головного екрану, підкреслює, що тематика стосується Збройних Сил України в цілому, а Сухопутних військ безпосередньо, привертає увагу користувачів до того, що Сухопутні війська є видом Збройних Сил України (рис. 6).

Крім цього, використання градієнтної заливки дозволяє оригінально виділити заголовок екрану.

У даному вигляді головного екрану градієнтний фон зробив інтерфейс стриманим і водночас не нудним. Екран став більш живим і привабливим для цільової аудиторії.

Такого ж стилю дотримано і при створенні решти екранів видання, окрім обкладинки.

Не останню роль у приверненні уваги, створенні першого враження про видання відіграє дизайн обкладинки.



Рис. 6. Ескіз головного екрану електронного мультимедійного навчального посібника «Тактична підготовка (механізоване відділення)» (варіант 3)

Саме на екрані обкладинки була реалізована вимога щодо відображення елементів символіки – логотипів Збройних Сил України та Військово-юридичного інституту Національного юридичного університету імені Ярослава Мудрого.

Ідея створення кольорової гама екрану обкладинки базується на контрасті діаметрально протилежних кольорів: жовтого і синього як символу національного прапора України, зеленого – як символу військового, поля бою, з ефектом їх розмиття (рис. 7). Подряпини ж на

фоні екрану символізують «шрами», отримані підрозділами при виконанні бойових завдань, а підсвічування від бойової групи механізованого відділення – віру в перемогу.

Для реалізації ідеї створено перший шар – камуфляж зеленого кольору з плямами його відтінків, 28 % прозорості для зменшення контрастності і використання ефекту фонового розмиття.

Другий шар – прямокутні фігури по діагоналі екрану кольорів національного прапора з використанням градієнтної заливки 0–100 % прозорості для просвічування камуфльованого фону і створення ефекту тіні і розмитості.

Бойова група механізованого відділення, показана на цьому фоні, виглядає гармонійно і розкриває тематику видання.

Розташування логотипів у верхньому лівому куті екрану забезпечує просування бренду Збройних Сил України та Військово-юридичного інституту.

Проблема застосування для типографіки виключно базового шрифту комунікації Збройних Сил України UAF Sans може бути вирішена шляхом використання для акценту різних розмірів даного шрифту (кегля) та зміною накреслень (рис. 7). Курсив шрифту може бути створено використанням можливостей програми Figma щодо нахилу літер.



Рис. 7. Ескіз обкладинки електронного мультимедійного навчального посібника «Тактична підготовка (механізоване відділення)»

Такі дизайнерські рішення щодо створення графічного стилю електронного мультимедійного навчального посібника «Тактична підготовка (механізоване відділення)» отримали схвальні відгуки робочої групи Збройних Сил України з розробки графічного стилю у військовій комунікації Збройних Сил України і забезпечують більшу відповідність видання тематиці і цільовій аудиторії.

Висновки

Таким чином, впровадження графічного стилю Збройних Сил України в дизайн електронного мультимедійного навчального посібника «Загальна тактика (механізоване відділення)» з урахуванням тематики видання і зацікавлення цільової аудиторії може бути здійснене наступними шляхами:

1. Створення гармонійного сполучення близьких за насиченістю кольорів (створення контрасту за насиченістю) «Мундир» і «Степ» способом радіальної градієнтної заливки фону екранів.

2. Розроблення кольорової гама екрану обкладинки, яка базується на контрасті діаметрально протилежних кольорів: жовтого і синього як символу національного прапора України, зеленого – як символу військового, поля бою, з ефектом їх розмиття.

3. Розташування логотипів Збройних Сил України та Військово-юридичного інституту на екрані обкладинки.

4. Використання для акценту при створенні типографіки базового шрифту комунікації Збройних Сил України UAF Sans різних розмірів та зміна його накреслень, створення курсиву за допомогою можливостей програми Figma щодо нахилу літер.

Список літератури:

1. Положення про особливості організації освітнього процесу у вищих військових навчальних закладах Міністерства оборони України, військових навчальних підрозділах закладів вищої освіти, закладах фахової передвищої військової освіти : затв. наказом М-ва оборони України від 15 лютого 2024 р. № 120. Офіційний портал Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0453-24#Text>

2. Керівництво з використання графічного стилю у візуальній комунікації Збройних Сил України. Київ : Збройні сили України, 2024. 194 с.

3. Порядок проведення базової загальновійськової підготовки громадян України, які здобувають вищу освіту, та поліцейських : затв. постановою Кабінету Міністрів України від 21 червня 2024 р. № 734 // Урядовий портал. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennia-poriadku-provedennia-bazovoi-zahalnoviiskovoi-pidphoto-a734>.

4. Скориніна-Погребна О. В. Соціально-психологічний портрет студентської молоді м. Харкова // Сучасне суспільство. 2013. № 2. С. 149–156. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/cuc_2013_2_14

5. Положення про електронний підручник : затв. наказом М-ва освіти і науки України від 02 травня 2018 р. № 440. Офіційний портал Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0621-18#Text>

6. Пушкар О. І. Мультимедійне видавництво : навч. посіб. 2-ге вид., допов. і перероб. Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2022. 212 с.

7. Бондар І. О. Теорія кольору : навчальний посібник для студентів напряму підготовки 6.051501 «Видавничо-поліграфічна справа». Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. 164 с.

8. Іщенко О. І., Кулішова Н. Є. Розробка дизайну електронного мультимедійного видання для шкільного предмета «Мистецтво». Веб-сайт. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/20e1bf41-1b0c-45ee-90ba-8d17cc86dffe/content>.

9. Психологія кольору. *Dissidend* : веб-сайт. URL: <https://dissidend.com/journal/psychology-color/>.

10. Романенко Н. Г. Колір в просторово-предметному середовищі : конспект лекцій для студентів спеціальності 022 Дизайн освітнього рівня бакалавра освітньо-професійних програм: Графічний дизайн, Дизайн середовища, Промисловий дизайн, Дизайн одягу [Електронний ресурс]. Черкаси : ЧДТУ, 2021. 196 с. URL: <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/2595>.

Надійшла до редколегії 03.12.2024

Відомості про авторів:

Бізюк Андрій Валерійович – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри медіасистем та технологій, Україна; e-mail: andrii.biziuk@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9830-9206>

Зміївська Наталія Геннадіївна – Харківський національний університет радіоелектроніки, студентка групи ВПВПС-21-2, Україна; e-mail: natalia.zmiivska@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4488-6205>

*А.В. ПАЛЄСВ, В.Г. КОТУХ, канд. техн. наук, Ю.Ю. ГУСЄВА, д-р техн. наук,
К.М. ПАЛЄСВА*

ДО ПИТАННЯ ОБГРУНТУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Вступ

В умовах сьогодення існує багато викликів щодо роботи систем газопостачання. Суттєва зміна за останні роки політичної та економічної ситуації, кількісного та якісного складу населення нашої держави, зміна логістичних шляхів, а, з іншого боку, стрімкий розвиток сучасних технологій та обладнання зумовлюють необхідність в зміні підходів до структури систем газопостачання. Зокрема це стосується питання проектування, перепроектування та реконструкції таких систем в умовах невизначеності. При цьому виникає низка проблем, вирішити які традиційними методами оптимізаційних розрахунків досить складно, а іноді зовсім неможливо. В першу чергу це стосується проблем, що виникають через економічні та технологічні аспекти формування систем газопостачання.

Однією з найактуальніших проблем, з якою постає в процесі розробки проєктів планування, перепланування та реконструкції газотранспортних систем, є задача максимального задоволення потреб в теплоенергопостачанні усіх груп споживачів (промислових підприємств, населення, інфраструктурних об'єктів і т. ін.) з урахуванням напрямків і зон розташування споживачів, видів та існуючих схем розподілу енергоносіїв тощо.

Тому вибір енергоносіїв та проектування схем теплоенергопостачання має здійснюватися не для окремих ізольованих районів або споживачів, а комплексно, для цілої більш чи менш значної групи, яка є відомою планувальною єдністю та визначається природними умовами, особливостями місцевої транспортної мережі, спільністю джерел енергії, а також виробничими та адміністративними зв'язками тощо. Це дозволить розробити базисний варіант відповідних транспортних комунікацій таких систем з метою оптимального трасування усіх розподільчих мереж і ліній, необхідних для забезпечення подачі енергоносія до можливих споживачів.

Тому питання обґрунтування математичних моделей техніко-економічних показників газотранспортних систем є актуальним та дозволить удосконалити процес створення та функціонування спеціальних методів та інформаційних технологій моніторингу стану газотранспортних систем в умовах невизначеності.

Викладення основного матеріалу

Питанням ефективності функціонування газотранспортних систем приділяється увага багатьох науковців. Зокрема, в роботі [1] розглядаються питання економічної ефективності функціонування газотранспортних підприємств та визначаються критерії її оцінки. В [2] автором визначаються критерії надійності функціонування локальних газотранспортних систем. В [3] «...приведені змістовні постановки задач оптимального планування режимів роботи складних газотранспортних систем».

Низка робіт присвячена висвітленню питань надійності та ефективності роботи окремих складових газотранспортних систем або окремих режимів їх роботи. Так, в [4] досліджується вплив «...чинників на аварійність лінійної частини магістральних газопроводів, з метою подальшого керування ними за допомогою ефективного процесу відтворення», робота [5] присвячена питанням надійності газоперекачувальних агрегатів та газопроводів, в [6] «...наведені результати аналітичних досліджень гідравлічної ефективності складних газотранспортних систем», в [7] досліджуються процеси витоків газу через дефекти в тілі магістра-

льних газопроводів та «...вплив зміни діаметра дефекту і відстані до місця витоку від початку перегону між компресорними станціями, на значення тиску та температури в кінці перегону».

Також було проаналізовано досвід організації роботи газотранспортних систем в інших країнах світу. Так, в [8] розглядаються економічні особливості організації загальної транспортної мережі в Японії, аналізуються фактори будівництва та експлуатації трубопроводів в умовах невизначеності, коротко- та довготривалі перспективи взаємодії окремих газових комунальних служб (з урахуванням їх взаємного розташування), визначається необхідність державної підтримки будівництва загальної системи газопроводів.

В [9] розглядаються питання доцільності переведення енергетичної системи Македонії з вугілля на природний газ та проводиться порівняльний аналіз шести окремих варіантів постачання природного газу споживачам з точки зору економічної, соціальної та екологічної доцільності.

В [10] досліджується методика та процедура оцінки ймовірності, аналізу наслідків і кількісної оцінки економічного ризику аварій системи газотранспортних трубопроводів на прикладі розташованої в Китаї ділянки трубопроводу, що включає лінійну частину та компресорну станцію. У свою чергу в [11] на основі аналізу витрат і вигод авторами запропонована методологія визначення цільової надійності газопостачання системи газопроводів, а також проводиться дослідження впливу терміну експлуатації системи на цільову надійність газопостачання (на прикладі реальної ділянки газопроводу, що розташована в Китаї).

Аналіз публікацій показав, що основна увага приділяється питанням експлуатації газотранспортних систем. Питання будівництва розглядаються, зазвичай, з точки зору загальнодержавної організації. Велика увага приділяється питанням забезпечення надійності функціонування та прогнозування режимів роботи саме магістральних газопроводів. Такий підхід спостерігається як в дослідженнях закордонних вчених, так і в роботах більшості вітчизняних авторів. Однак зміни внутрішньо- та зовнішньополітичної та економічної ситуації спонукають до швидких змін в організації системи енергопостачання нашої держави, а отже, і до певної зміни підходів до питання організації функціонування газотранспортних систем на усіх етапах їх життєвого циклу.

Етапи проектування, перепроєктування та реконструкції газотранспортних систем є одними з найважливіших етапів життєвого циклу, оскільки значні передумови надійності функціонування цих систем закладаються саме на цих етапах. Окрім того, газотранспортні системи є основними за матеріало-, ресурсо- та капіталоємністю спорудами будь-якої системи розподілу енергоносіїв. На їх спорудження, обслуговування та ремонт витрачається до 90 % усіх капітальних вкладень на системи теплоенергозабезпечення. Із загальної протяжності газотранспортних систем від 60 до 80 % складають газопроводи низького тиску і 20–30 % – середнього та високого тиску.

Згідно з [12], «...однією зі складових газотранспортних систем є газорозподільні системи. Газорозподільні системи мають широку номенклатуру складових та елементів, широкий перелік вимог до умов їх виготовлення, експлуатації та ремонту, вони знаходяться під дією великої кількості зовнішніх факторів тощо».

У загальному випадку будівництво газорозподільних систем, розташованих в межах будь-яких територіальних комплексів, наприклад області, міста, району міста тощо, є тривалим процесом поступового розширення системи енергопостачання, що охоплює усі нові групи і категорії споживачів. Зміна структури газорозподільних систем відбувається через зміну складу споживачів або з метою удосконалення конфігурації. Але такі зміни дуже рідко носять масовий характер і не вимагають прийняття термінових рішень.

Але через значні руйнування внаслідок воєнних дій та через зміну економічної ситуації, що відбулися в нашій країні в досить стислий період часу, виникла потреба пошуку нових підходів до надійності функціонування систем забезпечення енергоресурсами кінцевих споживачів, в тому числі газотранспортних систем. Наразі актуальними є питання децентраліза-

ції таких систем, спорудження нових, реконструкції та підтримання надійності функціонування окремих їх елементів та складових. Тому в даній статі автори ставлять собі на меті розглянути шляхи підвищення ефективності проектування, перепроєктування та реконструкції газорозподільних систем та обґрунтування математичних моделей техніко-економічних показників газорозподільних систем в умовах невизначеності.

Одним з питань, що потребують дослідження, є визначення оптимальної черговості будівництва та такого порядку введення в експлуатацію нової системи (або реконструкції існуючої системи), при якому загальні витрати за час будівництва (реконструкції) були б мінімальними [13]. Визначення оптимальної черговості будівництва газорозподільних систем повинно здійснюватися з урахуванням ряду характерних особливостей:

1. До складу газорозподільних систем входять дві групи споруд:

– ті, що забезпечують енергоспоживання певної єдиної територіальної одиниці (області, населеного пункту, району тощо) або єдиної групи споживачів;

– ті, що забезпечують енергоспоживання групи територіальних одиниць (груп споживачів), наприклад відводи від магістральних газопроводів та відгалуження від них (у випадку, коли вони необхідні, ГРС тощо).

2. При переході групи споживачів на споживання природним газом інші споживачі продовжують користуватися існуючою системою енергопостачання, економічність якої може знизитися внаслідок зниження інтенсивності її використання.

3. Окремі частини схем газорозподільних систем характеризуються різною економічною ефективністю. У цьому випадку при значному часі будівництва або реконструкції усієї системи енергоспоживання будь-якої територіальної одиниці (групи територіальних одиниць), його слід розглядати як тривалий в часі процес переходу до споживання природним газом нової групи (груп) споживачів.

4. Мережевий характер газорозподільних систем обумовлює велику кількість можливих варіантів будівництва (реконструкції). Можливість об'єднати споживачів в різні за складом групи, підвищуючи економічність енергопостачання, обумовлює різний економічний ефект за весь період будівництва.

5. Щільність розміщення територіальних одиниць обумовлює малу протяжність та діаметри лінійних елементів газорозподільних систем, а також малі обсяги робіт з підготовки споживачів до прийому газу. Наслідком цього є незначна величина пускових комплексів, будівництво яких може бути завершено в термін, що не перевищує один рік. Таким чином, для визначення черговості будівництва (реконструкції) складної мережевої схеми газорозподільних систем доцільно застосувати комплекс техніко-економічних показників, який включатиме математичні методи або моделі, які дозволять виокремити найоптимальніший варіант будівництва (реконструкції).

Розглянемо опис такої математичної моделі (рис. 1). Нехай споживачі певної єдиної територіальної одиниці для забезпечення своїх енергетичних потреб отримують енергоносії q видів. Економічно обґрунтованим може бути використання в одній територіальній одиниці для різних видів споживачів як одного, так і декількох видів енергоносіїв. Транспортування енергоносія здійснюється через певні «логістичні» пункти. Іноді такий пункт можна умовно замінити набором так званих допоміжних пунктів, у якості яких використовуються окремі види споживачів (склади, розподільчі станції тощо) [14].

Наприклад, якщо природним газом забезпечуються лише споживачі груп 1 та 3, то у вартість використання шляху від 1 до 3 слід включати лише додаткові витрати, що виникають під час переведення на природний газ виробничих об'єктів. Така модель допускає порівняння різних (з точки зору трасування) схем забезпечення будь-якої територіальної одиниці одним і тим саме енергоносієм, умовно вважаючи, що вони мають, наприклад, різні енергоносії [14].

Розглянемо схему постачання групи територіальних одиниць одним з енергоносіїв, а саме – природним газом. З достатнім ступенем точності її можна зобразити графом Γ^j ,

вершинами якого є окремі споживачі (групи споживачів), а дугами – шляхи транспортування j -го енергоносія між кожною парою суміжних споживачів.

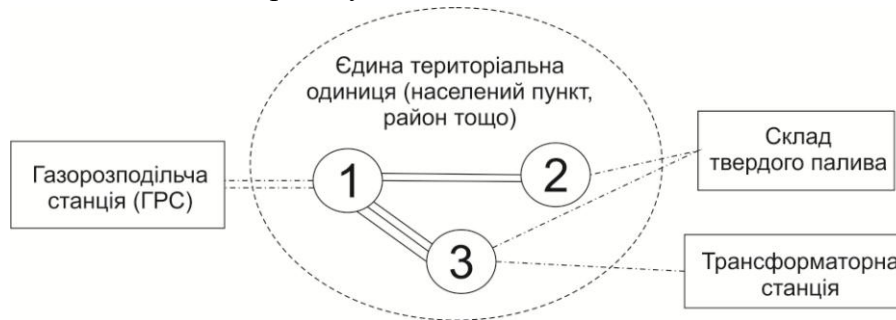


Рис. 1. Граф-схема постачання різними видами енергоносіїв єдиної територіальної одиниці (1 – комунально-побутові споживачі; 2 – опалювальне навантаження; 3 – виробничі споживачі)

Усі витрати, пов'язані з транспортуванням j -го енергоносія, можна поділити на дві групи. В першу групу можна включити витрати, які виконують виключно в інтересах кожного з розглянутих споживачів (групи споживачів) окремо. Наприклад, усі витрати, пов'язані з обладнанням i -го споживача (групи споживачів) для приймання j -го типу енергоносія, і кінцеві витрати на необхідну споживачеві i кількість j -го енергоносія. Загальну суму таких витрат позначають через a_i^j . У другу групу включимо витрати на будівництво (реконструкцію) та експлуатацію споруд, що знаходяться у загальному користуванні декількох споживачів. Прикладами таких споруд можуть бути ГРС, загальні ділянки газопроводів, склади тощо. Ці величини відповідатимуть дугам графу Γ^j . Величина цих витрат суттєво залежить від навантаження на дугу графа та режиму експлуатації системи [13].

Так, наприклад, діаметр трубопроводів будь-якої ділянки лінійної частини газорозподільної системи залежить, в першу чергу, від того, які споживачі, у якій мірі, за яких максимальних витрат часу та ресурсів будуть постачатися природним газом, а також від рівня тиску та втрат газу на цій ділянці. Тобто можна зазначити, що капітальні витрати на будівництво чи реконструкцію ділянки газорозподільної системи напряму залежать від експлуатаційних витрат на транспортування природного газу по цій ділянці.

Слід зазначити, що вид технологічного обладнання для транспортування енергоносіїв обирається з набору стандартних споруд. Пронумеруємо їх і позначимо через a_{im}^{jg} вартість використання графа витрат Γ^j , що транспортує енергоносії з пункту i в пункт m , якщо на цій ділянці використовується номер споруди g ($g = 1, 2, 3, \dots, G$). Наприклад, при $g = 1$, величина a_{im}^{j1} – це витрати на газопровід діаметром 100 мм на ділянці (i, m) , при $g = 2$ величина a_{im}^{j2} – витрати на газопровід діаметром 150 мм і т. д. Довільну сукупність пунктів (споживачів чи груп споживачів), що постачаються j -м енергоносієм, позначимо через y_j , а ту частину графа Γ^j , яка використовується для постачання пунктів з сукупності y_j , позначимо через $\Gamma^j(y_j)$ [14].

Задача полягає в розбитті пунктів кожної територіальної одиниці на множини U_1, U_2, \dots, U_g таким чином, щоб загальна сума витрат досягала свого найменшого значення:

$$f(y_1, y_2, \dots, y_g) = \sum_{j=1}^g \left(\sum_{(i,m) \in \Gamma^j(y_j)} a_{im}^{jg} + \sum_{i \in y_j} a_i^j \right), \quad (1)$$

де g – номер стандартної споруди для (i, m) у випадку, коли j -м енергоносієм постачаються споживачі, що входять в множину y_j [14].

Перша сума в дужках задає витрати на транспортування j -го енергоносія в пункти сукупності y_j , друга – першу групу витрат за тією саме сукупністю пунктів.

Позначимо через індекси Γ^1 і Γ^2 газорозподільну систему, яка буде спроектована, та систему, яка існує і підлягає реконструкції. Нехай Γ^1 – спроектована газорозподільна система, що складається з певних пунктів – споживачів теплової енергії, та ділянок системи з розташованим на них обладнанням під індексом w . Сукупність пунктів системи позначимо через A , і сукупність ділянок системи – через w^1 . Γ^2 – існуюча газорозподільна система, що підлягає реконструкції. Сукупність напрямків системи Γ^2 – є існуючими транспортними комунікаціями, що пов'язують між собою окремих споживачів, позначимо через w^2 . Причому сукупність напрямків системи Γ^2 буде аналогічна системі Γ^1 [14].

Нехай K_i^1 – капіталовкладення, необхідні для підготовки пункту i до приймання природного газу, тобто для будівництва ділянки газорозподільних систем та споживчих систем природного газу, K_w^1 – капіталовкладення, необхідні для будівництва напрямку транспортування природного газу w . Експлуатаційні витрати на транспортування природного газу за напрямком w подаємо у вигляді суми:

$$C_w^1 + a_w^1 x, \quad (2)$$

де C_w^1 – величина витрат, що не залежать від кількості транспортованого за напрямком w газу; a_w^1 – коефіцієнт пропорційності; x – кількість газу, що транспортується за напрямком w [14].

Нехай C_i^1 – експлуатаційні витрати при прийманні в пункт i природного газу, що включають в себе:

- кінцеві витрати на потрібну в цьому пункті кількість газу;
- сумарні транспортні витрати, що лінійно залежать від кількості транспортованого газу, і відповідають усім напрямкам від головного пункту до кожного споживача;
- витрати з експлуатації газорозподільних систем, а також споживчих систем використання газу у відповідному пункті (з урахуванням технологічного ефекту, що досягається при заміні газом раніше використовуваного енергоносія).

Аналогічно визначаються величини C_i^2 і C_w^2 , які характеризують експлуатаційні витрати за існуючою системою енергопостачання.

Стан газорозподільної системи в кожному мить часу зручно характеризувати переліком споживачів, що реалізують споживання природним газом. Позначимо через y деяку сукупність пунктів, що підлягають споживанню газом, а через $w^1(y)$ – множину напрямків системи Γ^1 , які для цього необхідні. Тоді ця частина системи Γ^1 буде характеризуватися вартістю основних фондів для будівництва газорозподільної системи окремої єдиної територіальної одиниці:

$$K^1(y) = \sum_{i \in y} K_i^1 + \sum_{w \in w^1(y)} K_w^1 \quad (3)$$

та експлуатаційними витратами

$$C^1(y) = \sum_{i \in y} C_i^1 + \sum_{w \in w^1(y)} C_w^1, \quad (4)$$

де $\sum_{i \in y} K_i^1$, $\sum_{i \in y} C_i^1$ – відповідно сумарні капіталовкладення та експлуатаційні витрати, пов'язані

з прийманням газу споживачами (пунктами), що належать до множини y ;

$\sum_{w \in w^1(y)} K_w^1$, $\sum_{w \in w^1(y)} C_w^1$ – те саме стосовно газорозподільних систем, що забезпечують подачу

газу до множини споживачів (пунктів) y [14].

Враховуючи вплив особливостей газорозподільних систем на методику визначення оптимальної черговості їх будівництва, слід сказати, що такі системи розміщуються з максимальним наближенням до найкрупніших споживачів, що мають високі показники ефективності енергоспоживання. Менш ефективні споживачі потрапляють в менш сприятливі умови і для їх енергопостачання необхідна додаткова локальна мережа, наявність якої ще більше знизить показники ефективності газопостачання в цілому [15].

Отже, з огляду на зазначене, доцільним є подальше доопрацювання розглянутих математичних моделей з урахуванням впливу наведених особливостей газорозподільних систем на методику визначення їх техніко-економічних показників.

Висновки

1. Газотранспортні та газорозподільні системи є основними за матеріало-, ресурсо- і капіталоемністю спорудами будь-якої системи розподілу енергоносіїв.

2. Визначення оптимальної черговості будівництва (реконструкції) газорозподільних систем повинно здійснюватися з урахуванням низки характерних особливостей.

3. При побудові математичної моделі газорозподільних систем слід враховувати, що економічно обґрунтованим може бути використання в одній територіальній одиниці для різних видів споживачів як одного, так і декількох видів енергоносіїв.

4. Схему постачання групи територіальних одиниць природним газом як одним з видів енергоносіїв, що здійснюється за допомогою газорозподільних систем, можна зобразити графом, вершинами якого є окремі територіальні одиниці, а дугами – шляхи транспортування енергоносія між кожною парою суміжних споживачів.

5. Діаметр трубопроводів будь-якої ділянки лінійної частини газорозподільної системи залежить, в першу чергу, від того, які споживачі, у якій мірі, за яких максимальних витрат часу та ресурсів будуть постачатися природним газом, а також від рівня тиску та втрат на цій ділянці.

6. Вид технологічного обладнання для транспортування енергоносіїв у складі газорозподільних систем обирається з набору стандартних споруд.

7. Стан газорозподільних систем як систем енергопостачання в будь-який момент часу зручно характеризувати переліком споживачів, що реалізують споживання природним газом.

8. Враховуючи особливості проектування та будівництва локальних газотранспортних систем, слід зазначити, що газорозподільні системи розміщуються з максимальним наближенням до найкрупніших споживачів, які мають високі показники ефективності енергоспоживання.

9. З огляду на вплив наведених особливостей газорозподільних систем на методику визначення їх техніко-економічних показників доцільним є подальше доопрацювання розглянутих математичних моделей, зокрема з точки зору визначення черговості будівництва та введення в експлуатацію окремих складових газорозподільних систем, що проектуються, перепроєктуються чи реконструюються. Крім того, слід дослідити питання технічних, економічних, екологічних та соціальних перспектив проектування, перепроєктування та реконструкції газорозподільних систем з точки зору концепції сталого розвитку та визначити шляхи подальшого їх ефективного функціонування в умовах невизначеності.

Список літератури:

1. Груб'як С.В. Дослідження шляхів підвищення ефективності діяльності газорозподільних підприємств // Економіка і суспільство. 2018. № 18. С. 340–344.
2. Степ'юк М.Д. Критерії надійності функціонування локальної системи // Наук. вісник Івано-Франків. нац. техн. ун-ту нафти і газу. 2009. № 1. С. 114–116.
3. Притула Н., Притула М., Фролов В. Оптиміальне планування режимів роботи складних газотранспортних систем // Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання». Івано-Франківськ : Голіней О.М., 2017. С. 414–417.
4. Федорович І.В. Надійність експлуатації лінійної частини магістральних газопроводів та дослідження причин аварійності // Агросвіт. 2013. № 5. С. 42–45.
5. Копей Б.В., Бенмуна А., Слободян В.І., Беллауар А., Галій С.І., Халімі Д., Найда А.М. Підвищення надійності газотранспортних систем : моногр. Сер. «Нафтогазове обладнання». Т. 8. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. 300 с.
6. Грудз В.Я. Діагностика гідравлічного стану складних газотранспортних систем // Наука та інновації. 2005. 1. № 5. С. 87–100.
7. Дорошенко Я. В. Моделювання витікань газу з газопроводів в аварійних ситуаціях // Вісник ВПІ. 2020. Вип. 3. С. 22–28.
8. Hashimoto S. The Importance of Government Support for Pipeline Network Construction // Pipeline Engineering - Design, Failure, and Management. 2022.
9. Mladenovska D., Lazarevska A. M. Socio-economic Indicators Influence in Terms of Natural Gas Supply Policy and Decision. TEM Journal. 2019. Vol. 8 (1). P. 132–143.
10. Shi G., Yu W., Wang K., Dang F., Gong J., Lu Y. Time-dependent economic risk analysis of the natural gas transmission pipeline system // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 146. P. 432–440.
11. Shan X., Yu W., Hu B., Wen K., Ren Sh., Men Y., Li M., Gong J., Zheng H., Hong B. A methodology to determine target gas supply reliability of natural gas pipeline system based on cost-benefit analysis // Reliability Engineering & System Safety. 2024. Vol. 251.
12. Палєєв А.В., Котух В.Г. До питання надійності та ремонтпридатності окремих елементів арматури газорозподільних систем // Комунальне господарство міст. Сер.: Технічні науки та архітектура. Харків, 2024. 1(182). С. 8–13.
13. Пешехонов Н.І. Проектування газопостачання. Київ, 1970. 147 с.
14. Берхман С.І. Економіка систем газопостачання. Ленінград : Недра, 1975. 375 с.
15. Дубінський Н.М. Надійність систем газопостачання. Київ, 1970. 215 с.

Надійшла до редколегії 07.10.2024

Відомості про авторів:

Палєєв Артем Вікторович – Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, аспірант, Україна, e-mail: artem.palieiev@kname.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6044-0786>

Котух Володимир Григорович – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, доцент кафедри нафтогазової інженерії та технологій, Україна, e-mail: volodimir.kotuh@kname.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6679-8620>

Гусєва Юлія Юрїївна – д-р техн. наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, професор кафедри управління проектами в міському господарстві і будівництві, Україна, e-mail: yulia.guseva@kname.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6992-543X>

Палєєва Катерина Миколаївна – Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, старший викладач кафедри нафтогазової інженерії та технологій, Україна, e-mail: kateryna.palieieva@kname.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6004-2331>

**SYSTEMS AND METHODS OF INFORMATION PROTECTION
СИСТЕМИ І МЕТОДИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ**

UDC 004.056.5:005.8

Information Security Risk Assessment for Personnel During Access Segregation to Company Resources / T.I. Korobeinikova, A.B. Yamnych // Radiotekhnika : All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2024. No 219. P. 7 – 15.

The article addresses the problem of information security risk assessment in the context of the human factor and the specifics of restricting employees' access to corporate resources. The aim of the study is to improve approaches to assessing information security risks for company personnel during the segregation of access to corporate information resources by developing and implementing a modified sequence of processes that considers the specifics of the human factor and helps minimize threats arising from employees' mistakes and malicious actions. The object of the research is the process of ensuring information security while managing personnel access to corporate resources. The subject of the research consists in the methods and procedures of information security risk assessment related to personnel activities, as well as the technological sequence of their implementation to minimize threats. The authors emphasize that, on the one hand, company personnel are among its most valuable assets, and on the other hand, they can also be a potential source of threats to information security. Modern approaches to risk assessment are analyzed, including international standards that can serve as a foundation for implementing a comprehensive protection system. It is demonstrated that the key task in protecting information resources is the appropriate definition of roles and categories of personnel, considering their responsibilities and level of accountability. A nine-step sequence is proposed to optimize access segregation, encompassing resource identification and classification, auditing the current security system, proactive risk assessment, formulating recommendations, and implementing new measures. Methods of profiling employees are described, taking into consideration their competencies, behavioral characteristics, and opportunities to access confidential data. Special attention is paid to Role-Based Access Control policies and authentication methods, including password systems and more advanced technologies. The importance of regular auditing and monitoring for timely detection of new threats and vulnerabilities is highlighted. Thus, the application of the developed risk assessment model makes it possible to reduce the number of human errors, enhance the level of business process security, and optimize the management of access to critical resources. The results obtained can be integrated into the company's information security system to ensure the continuous improvement of protective mechanisms, which positively affects the enterprise's reputation and minimizes potential financial losses.

Keywords: information security; risks; personnel; access segregation; personnel profiling; restricting access to corporate resources.

3 fig. Ref: 21 items.

УДК 004.056.5:005.8

Оцінювання ризиків інформаційної безпеки для персоналу під час розмежування доступу до ресурсів компанії / Т.І. Коробейнікова, А.Б. Ямнич // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2024. Вип. 219. С. 7 – 15.

Висвітлено проблематику оцінювання ризиків інформаційної безпеки в контексті людського чинника та особливостей розмежування доступу персоналу до корпоративних ресурсів. Мета дослідження – вдосконалення підходів до оцінювання ризиків інформаційної безпеки для персоналу компанії під час розмежування доступу до корпоративних інформаційних ресурсів за рахунок розроблення та впровадження модифікованої послідовності процесів, яка враховує специфіку людського чинника і сприяє мінімізації загроз, що виникають через помилки та зловмисні дії персоналу. Об'єкт дослідження – процес забезпечення інформаційної безпеки під час керування доступом персоналу до корпоративних ресурсів. Предмет дослідження – методи та процедури оцінювання ризиків інформаційної безпеки, пов'язані з діяльністю персоналу, а також технологічна послідовність їх впровадження для мінімізації загроз. Автори наголошують, що персонал компанії, з одного боку, є одним із найважливіших активів, а з іншого – потенційним джерелом загроз для інформаційної безпеки. Проаналізовано сучасні підходи до оцінювання ризиків, зокрема розглянуто міжнародні стандарти, які можуть слугувати базою для впровадження комплексної системи захисту. Доведено, що ключовим завданням у захисті інформаційних ресурсів є належне визначення ролей та категорій персоналу з урахуванням їхніх обов'язків і рівня відповідальності. Для оптимізації розмежування доступів запропоновано послідовність із дев'яти етапів, що охоплюють ідентифікацію та класифікацію ресурсів, аудит чинної системи безпеки, проактивне оцінювання ризиків, створення рекомендацій і впровадження нових заходів. Описано методи профілювання працівників з урахуванням їхніх компетенцій, поведінкових особливостей і можливостей доступу до конфіденційних даних. Особливу увагу приділено політикам Role-Based Access Control та методам автентифікації, включно з паролними системами та сучаснішими технологіями. Підкреслено важливість регулярного аудиту й моніторингу задля своєчасного виявлення нових загроз і вразливостей. Таким чином, застосування розробленої моделі оцінювання ризиків дозволяє зменшити кількість людських помилок, сприяє підвищенню рівня захищеності бізнес-процесів та оптимізації керування доступом до критичних ресурсів. Отримані результати можуть бути інтегровані в систему ін-

формаційної безпеки компанії задля забезпечення безперервного вдосконалення захисних механізмів, що позитивно вплине на репутацію підприємства й мінімізує потенційні фінансові втрати.

Ключові слова: інформаційна безпека; ризики; персонал; розмежування доступу; профілювання персоналу; розмежування доступу до корпоративних ресурсів.

Лл. 3. Бібліогр.: 21 назв.

UDC 004.45 519.1

Application of rank approach algorithms in planning task distribution in multiprocessor systems / D.Yu. Golubnychiy, O.S. Holovchenko // Radiotekhnika : All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2024. No 219. P. 16 – 27.

The article discusses the application of rank-based algorithms in planning task distribution in multiprocessor systems, which is currently a fairly pressing issue related to the evolution of computing devices, mass transition to multi-core processor architectures, widespread use of Internet resources, and, at the same time, demand for servers and data centers. Evidence is provided of the possibility to reduce the task planning problem in multiprocessor systems to the multiple solution of the integer programming problem with Boolean variables (IPP with Bv).

The authors consider two approximate algorithms for solving the IPP problem with Bv using the example of the classical knapsack problem. Both algorithms are based on the fundamentals of the rank approach. The operation of both is based on the work of the general procedure for constructing solution vectors A0 using the rules for cutting off unpromising paths L1, L2, L3. The logic of each of the three strategies and software options for their implementation are considered. It was found that strategies L1 and L2 can be implemented by sorting or linear search for suitable vectors for constructing vectors of the next rank. For strategy L3, which in its standard form offers cutting off paths based on their maximum potential increase in functionality, a modification is proposed that allows cutting off a larger number of paths without performing checks for each of them. The process of declaring security profiles includes several stages, such as assessing the current state of security, identifying threats and vulnerabilities, defining security requirements, developing and implementing security profiles, and regularly monitoring and updating security measures.

The authors present the results of experimental studies, according to which, when using approximate algorithms A1 and A2, the obtained answer usually does not exceed 10% of the error from the exact one, regardless of the selected software implementation. At the same time, it is possible to reduce the number of analyzed vectors to 170,000 versus 2^{150} in the case of a complete enumeration. Using the proposed modification for the L3 strategy allows us to reduce the number of analyzed vectors by an average of another 40,000.

The authors conclude that among the proposed algorithms, the most advantageous is the use of A2 implemented using the L1 strategy through a linear search and a modified L3 strategy.

Keywords: search algorithms; vectors; rank approach; task distribution; strategies for cutting off unpromising paths; integer linear programming with Boolean variables.

1 tabl. 5 fig. Ref: 8 items.

УДК 004.45 519.1

Застосування алгоритмів рангового підходу при плануванні розподілу задач в багато процесорних системах / Д.Ю. Голубничий, О.С. Головченко // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2024. Вип. 219. С. 16 – 27.

Розглядається застосування алгоритмів рангового підходу при плануванні розподілу задач у багато процесорних системах, що на сьогодні є досить актуальною проблемою, пов'язаною з еволюцією обчислювальних пристроїв, масовим переходом до багатоядерних процесорних архітектур, широким використанням інтернет-ресурсів, а разом із тим попитом на сервери та дата-центри. Наводяться докази можливості зведення завдання планування розподілу задач у багато процесорних системах до багаторазового вирішення задачі цілочисельного програмування з булевими змінними (ЦЛП з БЗ).

Автори розглядають два наближені алгоритми вирішення задачі ЦЛП з БЗ на прикладі класичної задачі про ранець. Обидва алгоритми базуються на засадах рангового підходу. Дія обох заснована на роботі загальної процедури побудови векторів рішень A0 з використанням правил відсікання безперспективних шляхів L1, L2, L3. Розглядаються логіка роботи кожної з трьох стратегій та програмні варіанти їх реалізації. Встановлено, що стратегії L1 та L2 можуть реалізуватися через сортування або лінійний пошук підходящих векторів для побудови векторів наступного рангу. Для стратегії L3, що у стандартному вигляді пропонує відсікання шляхів, базуючись на їхньому максимальному потенційному прирості функціоналу, запропоновано модифікацію, яка дозволяє відсікати більшу кількість шляхів, не виконуючи перевірки для кожного з них.

Наведено результати експериментальних досліджень, згідно з якими при використанні наближених алгоритмів A1 та A2 отримувана відповідь, як правило, не виходить за межі 10 % похибки від точної незалежно від обраної програмної реалізації. При цьому вдається знизити кількість векторів, що аналізуються, до 170000 супроти 2^{150} – в разі повного перебору. Використання запропонованої модифікації для стратегії L3 дозволяє зменшити кількість векторів, що аналізуються, в середньому ще на 40000.

Зроблено висновок про те, що серед запропонованих алгоритмів найбільш вигідним є використання A2, реалізованого з використанням стратегії L1 через лінійний пошук, та модифікованої стратегії L3.

Ключові слова: алгоритми пошуку; вектори; ранговий підхід; розподіл задач; стратегії відсікання безперспективних шляхів; цілочисельне лінійне програмування з булевими змінними.

Табл. 1. Лл. 5. Бібліогр.: 8 назв.

UDC 004.056.53

Ensuring user anonymity in online surveys / I.V. Oleshko, K.O. Papazov // Radiotekhnika : All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2024. No 219. P. 28 – 35.

The paper addresses the pressing issue of ensuring user anonymity during online surveys. The privacy risks associated with JavaScript are analyzed, which, on the one hand, provides interactivity and convenience of surveys, and on the other hand, creates a threat of data leakage through trackers and third-party scripts. It is noted that many survey platforms integrate third-party scripts that can collect users' personal information without their consent.

The paper provides an overview of existing privacy protection tools. It was found that the most popular tool among users is the Adblock Plus browser extension. The most popular platforms for online surveys (Google Forms, SurveyMonkey, Typeform, Xoyondo and others) are analyzed in terms of their ability to ensure user privacy. It was found that the level of protection varies from completely blocking scripts to their almost unlimited use.

An experimental study was conducted on the Windows 11 Pro x64 operating system using the IDE PyCharm 2024.3.1.1 (Community Edition) for writing Python code. It was found that the Ghostery tool is capable of blocking up to 87% of third-party scripts that could potentially affect user anonymity. It is shown that the Google Forms platform provides the best level of user anonymity among the considered applications. Further research on user anonymity applying machine learning methods is relevant and necessary, as it will enable more effective identification of obfuscated code.

Keywords: anonymity; privacy; online surveys; JavaScript; trackers; pseudonymization; data protection.

5 tabl. 4 fig. Ref: 16 items.

УДК 004.056.53

Забезпечення анонімності користувачів при проведенні онлайн-опитувань / I.V. Олешко, К.О. Папазов // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2024. Вип. 219. С. 28 – 35.

Розглядається актуальна проблема забезпечення анонімності користувачів під час онлайн-опитувань. Аналізуються ризики для конфіденційності, пов'язані з використанням JavaScript, який, з одного боку, забезпечує інтерактивність і зручність опитувань, а з іншого – створює загрозу витоку даних через трекери та сторонні скрипти. Зазначається, що багато платформ для проведення опитувань інтегрують сторонні скрипти, які можуть збирати персональну інформацію користувачів без їхньої згоди.

Розглянуто основні інструменти для дослідження анонімності. Виявлено, що найбільш популярним інструментом серед користувачів є розширення для браузера Adblock Plus. Проводиться аналіз найпопулярніших платформ для онлайн-опитувань (Google Forms, SurveyMonkey, Typeform, Xoyondo та інших) з точки зору їхньої здатності забезпечувати конфіденційність користувачів. Виявлено, що рівень захисту варіюється від повного блокування скриптів до їх майже необмеженого використання.

Проведено експериментальне дослідження на операційній системі Windows 11 Pro x64 з використанням IDE PyCharm 2024.3.1.1 (Community Edition) для написання Python-коду. Виявлено, що інструмент Ghostery здатний блокувати до 87 % сторонніх скриптів, які потенційно можуть впливати на анонімність користувача. Показано, що платформа Google Forms забезпечує найкращий рівень анонімності користувачів серед розглянутих додатків. Актуальними та необхідними є подальші дослідження анонімності користувачів із застосуванням методів машинного навчання, що дозволить ефективніше ідентифікувати обфусковані коди.

Ключові слова: анонімність; конфіденційність; онлайн-опитування; JavaScript; трекери; псевдонімізація; захист даних.

Табл. 5. Іл. 4. Бібліогр.: 16 назв.

UDC 681.3.06

Application of the LINE encryption scheme in the key encapsulation mechanism for the authentication protocol in 5G networks / Y. Kotukh, G. Khalimov, I. Dzhura, H. Hivrenko // Radiotekhnika : All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2024. No 219. P. 36 – 45.

The 5G network is a key driver of digital transformation and the Fourth Industrial Revolution. The services offered by the 5G platform are synergistic and scalable, allowing for significantly increased data rates across different radio access technologies (RATs). 5G technology allows companies to connect more devices with faster information exchange, which leads to increased potential vulnerabilities and significantly expanded threat and attack vectors. Security and privacy issues, such as network spoofing and lack of privacy in previous RAN generations, have been closely studied by security experts. To address these issues, the 3GPP standardization bodies have defined the AKA authentication and key management protocol and procedures. These include mutual authentication between user devices and the network, signal integrity and confidentiality, and derivation of cryptographic keys to protect U-plane and C-plane data.

However, there are significant vulnerabilities in the 5G network APIs, in particular regarding weak protection of user personal data and the possibility of unauthorized access to IoT devices. These vulnerabilities are critical for remote control systems. The 5G-AKA protocol has been found to have shortcomings and it is generally believed that AKA does not provide adequate protection of personal data from active attackers. It is noted that AKA needs to be endowed with essential security features that are currently missing.

The paper considers the implementation of quantum-protected encryption for the development of authentication protocols and key distribution in networks. The paper presents a key encapsulation algorithm based on the LINE cryptosystem with logarithmic signatures for the development of authentication and key coordination protocols in 5G net-

works. The use of LINE directional encryption offers advantages in scalability and heterogeneity, optimizing the computational and operational costs of the network.

Keywords: LINE cryptosystem; 5G network; authentication; key distribution; logarithmic signature; API.

Ref: 19 items.

УДК 681.3.06

Застосування схеми шифрування line в механізмі інкапсуляції ключів для протоколу автентифікації в мережах 5G / С.В. Котух, Г.З. Халімов, І.Є. Джура, Г.О. Хівренко // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2024. Вип. 219. С. 36 – 45.

Мережа 5G є ключовим двигуном цифрової трансформації та Четвертої промислової революції. Послуги, які пропонує платформа 5G, є синергетичними та масштабованими, що дозволяє значно збільшити швидкість передачі даних за допомогою різних технологій радіодоступу (RAT). Технологія 5G дозволяє компаніям підключати більше пристроїв із швидшим обміном інформацією, що призводить до підвищення потенційної вразливості та значного розширення векторів загроз і атак. Питання безпеки та конфіденційності, такі як підrobка мережі та відсутність конфіденційності в попередніх поколіннях RAN, були ретельно вивчені експертами з безпеки. Щоб вирішити ці проблеми, органи стандартизації 3GPP визначили протокол і процедури автентифікації АКА та керування ключами. Вони включають взаємну автентифікацію між пристроями користувача та мережею, цілісність і конфіденційність сигналів, а також отримання криптографічних ключів для захисту даних площини U та S.

Однак існують значні вразливості в API-інтерфейсах мережі 5G, зокрема щодо слабкого захисту особистих даних користувачів і можливості несанкціонованого доступу до пристроїв IoT. Ці уразливості є критичними для систем дистанційного керування. В протоколі 5G-АКА були виявлені недоліки і, зазвичай, вважається, що АКА не забезпечує належного захисту персональних даних від активних зловмисників. Відзначено, що АКА необхідно наділити необхідними властивостями безпеки, які наразі відсутні.

Розглянуто впровадження квантово-захисного шифрування для розробки протоколів автентифікації та розподілу ключів у мережах. Запропоновано алгоритм інкапсуляції ключів на основі криптосистеми LINE з логарифмічними підписами для розробки протоколів автентифікації та координації ключів у мережах 5G. Використання спрямованого шифрування LINE пропонує переваги в масштабованості та неоднорідності, оптимізуючи обчислювальні і операційні витрати мережі.

Ключевые слова: криптосистема LINE; мережа 5G; автентифікація; розподіл ключів; логарифмічний підпис; API.

Бібліогр.: 19 назв.

AUTOMATION AND ROBOTICS АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА РОБОТОТЕХНІКА

UDC 004.8:681.5

Development and study of the algorithm for automated recognition of gas meter readings / O.V. Zubkov, O.C. Yakovenko, C.V. Starokozhev, M.V. Skorbatuk // Radiotekhnika : All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2024. No 219. P. 46 – 52.

The relevance of developing an algorithm for automatic recognition of gas meter readings for test benches and real-time monitoring has been substantiated. A review of modern methods for recognizing readings on meter images has been conducted. The choice of the YOLOv10s neural network architecture for recognizing meter readings has been justified. The efficiency of the chosen architecture was validated after training it on a created meter images dataset. Based on the testing results, a second stage of recognition results processing was added, allowing the removal of background fragment detections and sorting the sequence of meter reading digits. In the second stage, a developed convolutional neural network was also employed, ensuring repeated verification of readings and error detection during recognition.

Keywords: counter; recognition; neuron; chain; algorithm; convolution; architecture.

1 tabl. 3 fig. Ref: 17 items.

УДК 004.8:681.5

Розробка та дослідження алгоритму автоматизованого розпізнавання показань газових лічильників / O.V. Zubkov, O.C. Yakovenko, C.V. Starokozhev, M.V. Skorbatuk // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2024. Вип. 219. С. 46 – 52.

Обґрунтовано актуальність створення алгоритму автоматичного розпізнавання показань газових лічильників для стендів та поточного контролю показань. Виконано огляд сучасних методів для розпізнавання показань на зображеннях лічильників. Обґрунтовано вибір архітектури нейронної мережі YOLOv10s для розпізнавання показань на зображеннях лічильників. Ефективність обраної архітектури перевірено після її навчання на створеному датасеті зображень лічильників. На основі результатів тестування додано другий етап обробки результатів розпізнавання, що дозволяє видалити результати розпізнавання фрагментів фону та сортувати послідовність цифр показань лічильника. На другому етапі також використана розроблена згортоква нейронна мережа, що забезпечила повторну перевірку показань та виявлення помилок при розпізнаванні.

Ключові слова: лічильник; розпізнавання; нейрон; мережа; алгоритм; згортка; архітектура.

Табл. 1. Іл. 3. Бібліогр.: 17 назв.

UDC 621.372(075)

Using the ARCore library to visualize keypoint clouds in navigation systems / A.A. Sokolov, O.G. Avrunin // Radiotekhnika : All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2024. No 219. P. 53 – 58.

The article explores the prospects of using the ARCore to create navigation systems tailored for visually impaired individuals. The ARCore is an augmented reality platform that combines visual and inertial odometry to ensure precise device localization in space. The authors describe the key principles of the ARCore, including methods for extracting and tracking key points, integrating IMU readings, and calculating movement trajectories.

Special attention is given to the architecture of the navigation system, which relies on smartphones to perform computational tasks such as SLAM algorithm implementation and neural network inference. The system processes data locally on the smartphone and transmits the results to a tactile feedback module via Bluetooth. This approach ensures the affordability and compactness of the final product.

To improve data accuracy, the authors propose the use of clustering algorithms such as DBSCAN, Local Outlier Factor (LOF), and the Kalman filter. These methods are aimed at filtering out noise and stabilizing data, which is particularly crucial for building effective navigation systems.

In conclusion, the authors highlight that combining the ARCore with neural networks and modern data processing algorithms opens new possibilities for creating accessible and functional solutions to improve the mobility of visually impaired individuals. Future research will focus on optimizing algorithms, training neural networks on specialized datasets, and experimentally testing the system in real-world conditions.

Keywords: navigation systems; keypoint clouds; human health; distance visualization; data processing.

4 fig. Ref: 19 items.

УДК 621.372(075)

Використання бібліотеки ARCore для візуалізації хмари ключових точок у навігаційних системах / А.А. Соколов, О.Г. Аврунін // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2024. Вип. 219. С. 53 – 58.

Розглянуто перспективи використання ARCore для створення навігаційних систем, орієнтованих на незрячих людей. ARCore є платформою доповненої реальності, що базується на поєднанні візуальної та інерційної одометрії, що забезпечує точну локалізацію пристрою у просторі. Описано ключові принципи роботи ARCore, зокрема методи виділення та відстеження ключових точок, інтеграцію показань IMU, а також обчислення траєкторії руху.

Особливу увагу приділено архітектурі навігаційної системи, яка базується на використанні смартфонів для виконання обчислювальних задач, таких як реалізація SLAM-алгоритмів і нейронних мереж. Система передбачає обробку даних локально на смартфоні та передачу результатів на тактильний модуль через Bluetooth. Такий підхід забезпечує доступність та компактність кінцевого продукту.

Для покращення точності даних запропоновано застосування кластеризаційних алгоритмів, таких як DBSCAN, локального фактора вибивання (LOF) і фільтра Калмана. Ці методи спрямовані на відсівання шумів і стабілізацію даних, що особливо важливо для побудови ефективних навігаційних систем.

Відзначено, що використання ARCore у поєднанні з нейронними мережами і сучасними алгоритмами обробки даних відкриває нові перспективи для створення доступних і функціональних рішень для покращення мобільності незрячих людей. Подальші дослідження включатимуть оптимізацію алгоритмів, навчання нейронних мереж на спеціалізованих наборах даних, а також експериментальне тестування системи в реальних умовах.

Ключові слова: навігаційна система; хмара ключових точок; здоров'я людини; візуалізація відстані; обробка даних.

Лл. 4. Бібліогр.: 19 назв

RADIO ELECTRONIC SYSTEMS РАДІОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ

UDC 621.396.96

Analysis of sounding signals of radioacoustic sounding systems of the atmosphere in the functional space / A.P. Shamrai, I.E. Kondrashov // Radiotekhnika : All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2024. No 219. P. 59 – 67.

Systems of radio acoustic sounding (RAS) of the atmosphere provide information on the state of processes occurring in the lower layers of the atmosphere. They allow measuring vertical profiles of atmospheric temperature, wind speed, and air humidity. The obtained information is used in applied tasks to ensure the takeoff and landing of aircraft, weather forecasting, and the study of atmospheric processes. However, the effectiveness of the existing radio-acoustic means is insufficient, and there are practical needs for the development of appropriate promising structures and algorithms that will be implemented during the construction of specific stations.

The article presents new approaches and a new mathematical apparatus developed for use in the analysis and synthesis of probing signals of the RAS systems. The process of interaction of acoustic and electromagnetic signals in the environment is described using functional analysis and abstract mathematical spaces, which will make it possible to consider such signals together, use visual geometric representations, and generally increase the effectiveness of the tasks of research and synthesis of such complex, heterogeneous signals.

The features of the distance surfaces for different pairs of probing signals were studied using the method of mathematical modeling. The general regularities of the studied surfaces of signal distances are as follows: there is a certain main lobe of the surface in which the connection of sounding acoustic and electromagnetic signals of different physical nature is significant. As the values of the parameters of the functional space increase, the degree of signal communication decreases, and depending on the shape of the contour signals, side lobes of the surface can be observed, the sizes of which depend on the characteristic features of the contours.

The obtained research results will provide the possibility of setting up and solving the actual problems of analysis and synthesis of sounding signals using the mathematical apparatus of functional analysis.

Keywords: remote sensing of the atmosphere; temperature; method; analysis; synthesis; probing signal; functional analysis; optimality criterion.

9 fig. Ref: 23 items.

УДК 621.396.96

Аналіз зондувальних сигналів систем радіоакустичного зондування атмосфери в функціональному просторі / А.П. Шамрай, І.С. Кондрашов // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2024. Вип. 219. С. 59 – 67.

Системи радіоакустичного зондування (РАЗ) атмосфери забезпечують отримання інформації про стан процесів, що відбуваються в нижніх шарах атмосфери. Вони дозволяють вимірювати вертикальні профілі температури атмосфери, швидкості вітру, вологості повітря. Отримана інформація використовується в прикладних задачах для забезпечення зльоту та посадки літальних апаратів, прогнозування погоди, вивчення атмосферних процесів. Проте ефективність існуючих радіоакустичних засобів є недостатньою і існують потреби практики з розробки відповідних перспективних структур та алгоритмів, що реалізуватимуться при побудові конкретних станцій.

Розроблено нові підходи і новий математичний апарат для використання в задачах аналізу і синтезу зондувальних сигналів систем РАЗ. Описано процес взаємодії акустичних і електромагнітних сигналів в середовищі за допомогою функціонального аналізу і абстрактних математичних просторів, що дозволить розглядати такі сигнали сумісно, використовувати наочні геометричні подання і підвищити ефективність задач дослідження і синтезу таких комплексних, різномірних сигналів.

Методом математичного моделювання вивчено особливості поверхонь відстаней для різних пар зондувальних сигналів. Загальні закономірності вивчених поверхонь відстаней сигналів такі: є деяка головна пелюстка поверхні, у якій зв'язок зондувальних акустичного й електромагнітного сигналів, що мають різну фізичну природу, значний. У міру зростання значень параметрів функціонального простору ступінь зв'язку сигналів зменшується і, залежно від форм обвідних сигналів, можуть спостерігатися бічні пелюстки поверхні, розміри яких залежать від характерних особливостей обвідних.

Отримані результати досліджень забезпечать можливість постановки і вирішення актуальних задач аналізу і синтезу зондувальних сигналів з використанням математичного апарату функціонального аналізу.

Ключові слова: дистанційне зондування атмосфери; температура; метод; аналіз; синтез; зондувальний сигнал; функціональний аналіз; критерій оптимальності.

Л. 9. Бібліогр.: 23 назв.

UDC 007.51

Improving the level of formalization of management processes at the main stages of electronic countermeasures against small unmanned aircraft systems to obtain conflict advantages / V.M. Kantsedal // Radiotekhnika : All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2024. No 219. P. 68 – 81.

The possibilities are shown to achieve the RES complex conflict advantages in the dynamics of the conflict with a small unmanned system by rising its controllability as a result of improving the level of formalization of the processes for ensuring effectiveness at the main stages of its functioning. Along with the general features of the formalization of cycles within the stage-by-stage cognitive situational management of the REP complex, a number of its differences in the construction of control loops for individual stages are considered. They concern obtaining a high-quality information description of conflict situations when forming situational awareness, a well-founded choice of composition and optimization of the procedure for applying effective technical executive means of intelligence and various types of suppression in the contours of their management cycles. At the same time, a certain list of private performance characteristics and the values of their indicators, which are critically important for the UAS and the RES complex, is used as a systemic formalization tool for formalizing the description of conflict situations and management cycles for their resolution, which has certain features and relationships at individual stages.

The formed list of indicators of key private performance characteristics objectively reflects the conditions and results of the use of means of observation and counteraction of the RES complex to small UAS at the main stages of its functioning. The sequence of their application comprehensively covers the main components that affect the quality of functioning of the corresponding means of the circuits of the cycles of the internal stage situational control of the RES complex.

Increasing requirements for private performance characteristics, consistent with the vulnerabilities of UAVs, and restrictions on material resource costs and time shortages are sources of finding ways to effectively solve the problems

of timely (early) detection of small UAVs and the phased implementation of various types of their suppression, which are increasingly strengthened, taking into account the specifics and tactics of using UAS.

Keywords: unmanned aircraft system; radio electronic suppression; reconnaissance means; suppression means; situational management; private performance characteristics; formalization.

1 tabl. Ref: 15 items.

УДК 007.51

Поліпшення рівня формалізації процесів управління на основних етапах радіоелектронної протидії малій безпілотній авіаційній системі для отримання конфліктних переваг / В.М. Канцедал // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2024. Вип. 219. С. 68 – 81.

Показано можливості досягнення конфліктних переваг комплексу РЕП в динаміці конфлікту з малою безпілотною системою за рахунок покращення його керованості внаслідок поліпшення рівня формалізації процесів забезпечення результативності на основних етапах його функціонування. Розглянуто, поряд з загальними особливостями формалізації циклів внутрішньо етапного когнітивного ситуаційного управління комплексу РЕП, ряд її відмінностей при побудові контурів управління для окремих етапів. Вони стосуються отримання якісного інформаційного опису конфліктних ситуацій при формуванні ситуаційної обізнаності, обґрунтованого вибору складу та оптимізації порядку застосування ефективних технічних виконавчих засобів розвідки та різних видів придушення у контурах циклів управління ними. При цьому використовується сформований критично важливий для БАС та комплексу РЕП певний перелік приватних ТТХ та значень їх показників як системний інструмент формалізації опису конфліктної ситуації та циклів управління для її вирішення, що має певні відмінності та співвідношення на окремих етапах.

Сформований перелік показників ключових приватних ТТХ об'єктивно відображає умови та результати застосування засобів спостереження та протидії комплексу РЕП малій БАС на основних етапах його функціонування. Послідовність їх застосування комплексно охоплює основні складові, що впливають на якість функціонування відповідних засобів контурів циклів внутрішньо етапного ситуаційного управління комплексу РЕП.

Підвищення вимог до приватних ТТХ, узгоджених з вразливостями БАС, та обмеження на витрати матеріального ресурсу і дефіцит часу є джерелами пошуку шляхів ефективного вирішення проблем своєчасного (раннього) виявлення малих БПЛА та поетапної реалізації різних видів їх придушення, що наростаюче посилюються, із урахуванням специфіки та тактики застосування БАС.

Ключові слова: безпілотна авіаційна система; радіоелектронне придушення; засоби розвідки; засоби придушення; ситуаційне управління; приватні ТТХ; формалізація.

Табл. 1. Бібліогр.: 15 назв.

UDC 621.396

Mathematical modelling of unmanned aerial vehicle based wideband spectrum sensing / M.V. Buhaiiov // Radiotekhnika : All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2024. No 219. P. 82 – 91.

The number of low-power radio electronic devices is constantly increasing in modern information society. The detection of such radio frequency sources (RFS), their localization and parameters estimation using stationary radio monitoring equipment, especially in cities, is ineffective. By placing a sensor on an unmanned aerial vehicle (UAV), it is possible to collect data about spatial, frequency and time parameters of RFS in a certain volume by flying around it and analyzing received signals. The absence or incompleteness of a priori information about the RFS and the radio wave propagation medium requires the creation of an appropriate mathematical model that will take into account the unknown parameters of RFS and the radio wave propagation medium, as well as the movement of radio sensor. The aim of the article is to optimize the process of analyzing the electromagnetic environment using a panoramic spectrum sensor placed on UAVs by developing a mathematical model of the received signal that takes into account the effects of radio wave propagation caused by UAVs' movement. It was found that the change of received signal strength depends on distance between the transmitter and the receiver is determined by propagation losses, shadowing, fading due to multipath propagation and the non-isotropy of the directional patterns of the RFS. Processing received signal strength, taking into account the terrain and the location of other objects on the UAV flight trajectory, will allow us to approximately estimate the location of RFS provided that its position remains unchanged. An increase in the number of flights along different routes will increase the accuracy of estimating the coordinates of RFS. In result of the research, a mathematical model was obtained that describes the received signal strength under the influence of multi-scale fading and takes into account the scanning mode of the radio sensor, its movement, and unknown shape of the RFS antenna pattern. In modern information society, Proposals were made to separate fading components using low-pass filtering. This will make it possible to estimate the location of the RFS in the case of joint processing of the measured values of the received signal strength and the UAV flight trajectory.

Keywords: mathematical model; unmanned aerial vehicle; spectrum sensing; signal source; signal strength.

3 fig. Ref: 29 items.

УДК 621.396

Математична модель прийнятого сигналу панорамним засобом радіомоніторингу на безпілотному літальному апараті / М.В. Бугайов // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2024. Вип. 219. С. 82 – 91.

У сучасному інформаційному суспільстві постійно збільшується кількість малопотужних радіоелектронних випромінюючих засобів. Виявлення таких джерел радіовипромінювання (ДРВ), їх локалізація та оцінювання параметрів за допомогою стаціонарних засобів радіомоніторингу (РМ), особливо в містах, є малоефективним. Розмістивши на безпілотний літальний апарат (БпЛА) засіб РМ, можна реалізувати збирання даних про просторові, частотні та часові параметри ДРВ в деякому обмеженому просторі шляхом його обльоту та аналізу прийнятих сигналів. Відсутність або неповнота апріорної інформації щодо ДРВ та середовища поширення радіохвиль вимагає створення відповідної математичної моделі, що буде враховувати невідомі параметри ДРВ та середовища поширення радіохвиль, а також постійне переміщення засобу РМ. Метою статті є оптимізація процесу аналізу електромагнітної обстановки із використанням розміщеного на БпЛА панорамного засобу РМ шляхом побудови математичної моделі прийнятого сигналу, що враховує ефекти поширення радіохвиль спричинені переміщенням БпЛА. В ході досліджень встановлено, що зміна рівня прийнятого сигналу в залежності від дальності між передавачем та приймачем визначається втратами на поширення, затінення, завмирання за рахунок багатопробеневого поширення та неізотропністю діаграм спрямованості ДРВ. Оброблення вимірних значень потужності прийнятого сигналу з урахуванням рельєфу місцевості та розміщення інших об'єктів на маршруті польоту БпЛА дозволить наближено оцінити розміщення ДРВ за умови його незмінного положення. Збільшення кількості прольотів за різними маршрутами дозволить підвищити точність оцінювання координат ДРВ. У результаті досліджень отримано математичну модель, що описує потужність прийнятого сигналу в умовах впливу різномасштабних завмирань і враховує скануючий режим роботи засобу радіомоніторингу, його переміщення та невідому форму діаграми спрямованості антени ДРВ. Надано пропозиції щодо розділення складових затухання та завмирань із використанням низькочастотної фільтрації. Це дозволить оцінити місцеположення ДРВ у разі сумісного оброблення вимірних значень потужності прийнятого сигналу і траєкторії польоту БпЛА із засобом РМ.

Ключові слова: математична модель; безпілотний літальний апарат; радіомоніторинг; джерело радіовипромінювань; рівень сигналу.

Л. 3. Бібліогр.: 29 назв.

PHYSICS OF DEVICES, ELEMENTS AND SYSTEMS ФІЗИКА ПРИЛАДІВ, ЕЛЕМЕНТІВ І СИСТЕМ

UDC 629.7.064.5

New approaches to creating ultralight solar arrays for ultrasmall spacecrafts / V.M. Borshchov, O.M. Listratenko, M.A. Protsenko, I.T. Tymchuk, O.V. Kravchenko, K.G. Bilousov, I.T. Perekopskiy // Radiotekhnika : All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2024. No 219. P. 92 – 103.

New approaches to selecting design-technological solutions of improved relatively flexible ultralight solar modules based on aluminium-polyimide boards using the most novel thin multi-junction GaAs solar cells of a new generation with an efficiency of 30% – 32% were developed in this work. The developed approaches confirm principal possibility of manufacturing ultralight solar modules with an area of about 250 cm² with specific power per area about 336 – 364 W/m² and significantly increased specific power per mass not less than 309 – 453 W/kg (for solar cells 30% and 32% efficiency respectively) at BOL for solar arrays of ultra-small CubeSat-class spacecrafts, as well as for solar modules for solar arrays of stratospheric drone (quasi-satellites).

The technology proposed by the authors' team is used for manufacturing reliably protected solar arrays on carbon-plastic ultralight panels and relatively flexible aluminium-polyimide solar modules based on thin 3G30C – Advanced solar cells 80 microns thick with efficiency 30% from AZUR SPACE Solar Power company for CubeSat – 3U class spacecrafts. The developed new approaches allow manufacturing solar arrays with their total thickness up to 840 microns and mass no more than 42 g, what is 2,5 times less than for domestic ultra-small CubeSat – 3U spacecraft "GS-1" type from Yuzhnoye design office. At the same time, the estimated specific energy efficiency of such solar arrays at BOL for AM0 conditions, T = 25°C over the area can be about 336 W/m². The estimated specific energy efficiency of the arrays by mass can be at least 200 W/kg with a specific mass of the solar arrays by area about 1,55 kg/m².

Keywords: conditionally flexible ultralight solar module; lightweight carbon fiber panel; the battery on a lightweight carbon fiber panel.

2 tabl. 3 fig. Ref: 19 items.

УДК 629.7.064.5

Нові підходи до створення надлегких сонячних батарей для надмалих космічних апаратів / В.М. Борищов, О.М. Лістратенко, М.А. Проценко, І.Т. Тимчук, О.В. Кравченко, К.Г. Білоусов, І.Т. Перекопський // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2024. Вип. 219. С. 92 – 103.

Розроблено нові підходи для вибору КТР вдосконалених умовно гнучких надлегких сонячних модулів на алюміній-поліімідних платах з застосуванням у них найбільш сучасних тонких багатоперехідних GaAs ФП нового покоління з ККД 30 – 32%. Розроблені підходи підтверджують принципову можливість виготовлення надлегких сонячних модулів площею близько 250 см² з питомою потужністю по площі близько 336 – 364 Вт/м² та суттєво збільшеною питомою потужністю по масі не менше ніж 309 – 453 Вт/кг (для ФП з ККД 30 та 32 % від-

повідно) на початок ТАІ для БС надмалих КА класу CubeSat, а також для сонячних модулів для БС стратосферних БПЛА (квазісупутників).

Запропонована технологія застосована для виготовлення надійно захищених БС на вуглепластикових надлегких панелях і умовно гнучких алюміній-поліімідних сонячних модулях на основі тонких ФП марки 3G30C – Advanced товщиною 80 мкм з ККД 30 % компанії AZUR SPACE Solar Power для КА класу CubeSat – 3U. Розроблені нові підходи дозволяють забезпечити можливість виготовлення БС з сумарною товщиною до 840 мкм та масою не більше 42 г, що в 2,5 рази менше, ніж у вітчизняного надмалого КА «GS-1» класу CubeSat – 3U ДП «КБ «Південне». При цьому розрахункова питома енерговіддача таких БС на початок ТАІ для умов АМ0, T= 25°C по площі може становити близько 336 Вт/м². Розрахункова питома енерговіддача БС по масі може становити не менше 200 Вт/кг при питомій масі БС по площі близько 1,55 кг/м².

Ключові слова: умовно гнучкий надлегкий сонячний модуль; вуглепластикова надлегка панель; БС на вуглепластиковій надлегкій панелі.

Табл. 2. Л. 3. Бібліогр.: 19 назв.

UDC 535.366

Study of Flocke-Bloch waves depending on the spectral parameter for a one-dimensional photonic crystal / O.V. Kazanko, O.Ye Penkina // Radiotekhnika : All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2024. No 219. P. 104 – 111.

The presence of forbidden and permitted bands in the parameters of diffraction processes on crystal structures is one of the main phenomena, thanks to which the latter have mostly proven their practical application. An understanding of the nature of the appearance of such forbidden bands for one-dimensional photonic crystals is provided by dispersion equations. One of the forms of this dispersion equation can be written through the solution of the spectral equation taken in the context of the Sturm-Liouville problem, posed accordingly for a one-dimensional photonic crystal (the Sturm-Liouville problem arises in connection with the application of the method of separation of variables to the wave equation).

The current work is a continuation of the work on finding the 1st and 2nd derivatives by the spectral parameter from the solution of the spectral equation. In previous works, it was found that the 1st derivative of the solution of the spectral equation in terms of the spectral parameter is represented linearly through the solution itself and its derivative, but in terms of the spatial variable. This circumstance prompted us later to think about the possibility of writing down the 2nd derivative in a similar form. In this work, the dispersion equation for a one-dimensional photonic crystal is derived. According to the form of the equation obtained in such a way, it is fair to assign an important role to the functions that are the solution of the spectral equation in connection with the desire to develop an alternative view of the dispersion equation itself. It is also shown that it is possible to represent linearly the 2nd derivative of the solution of the spectral equation. The authors state that the coefficients of the 2nd derivative are relatively uncomplicated for functions bearing linearity (the function itself and its derivative with respect to the spatial variable). Finally, a linear differential equation of the 2nd order is written with respect to the solution of the spectral equation of the function as a function of the spectral parameter.

Keywords: Sturm-Liouville problem; photonic crystal; dispersion equation; Floquet-Bloch waves; two-layer periodic medium; solution of the spectral equation; spectral parameter; derivative of the spectral parameter.

Ref: 18 items.

УДК 535.366

Дослідження Флоке-Блохівських хвиль у залежності від спектрального параметра для одновимірного фотонного кристала / О.В. Казанко, О.Є. Пенкіна // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2024. Вип. 219. С. 104 – 111.

Наявність заборонених та дозволених зон в параметрах дифракційних процесів на кристалічних структурах є одним з основних феноменів, завдяки яким останні здебільше й зарекомендували своє практичне застосування. Розуміння характеру виникнення таких заборонених зон для одновимірних фотонних кристалів дається дисперсійним рівнянням. Одна за форм цього дисперсійного рівняння може записуватися через розв'язок спектрального рівняння, узятим в контексті у проблемі Штурма–Ліувілля, поставленої відповідно для одновимірного фотонного кристала (проблема Штурма–Ліувілля виникає у зв'язку із застосуванням методу розділення змінних до хвильового рівняння).

Робота є продовженням робіт з знаходження першої, другої похідних за спектральним параметром від розв'язку спектрального рівняння. У попередніх роботах було виявлено, що перша похідна від розв'язку спектрального рівняння за спектральним параметром представляється лінійно через сам розв'язок та свою похідну, але за просторовою змінною. Така обставина згодом спонукала замислитись над можливістю записати й другу похідну в аналогічному вигляді. У даній роботі виводиться дисперсійне рівняння для одновимірного фотонного кристала. За виглядом отриманого рівняння, функції, що є розв'язком спектрального рівняння, справедливо віддати важливу роль у зв'язку з прагненням розвивати альтернативний погляд на саме дисперсійне рівняння. Також показується існування можливості представити лінійно другу похідну від розв'язку спектрального рівняння. Автори констатують відносно неускладнення коефіцієнтів другої похідної при несучих лінійності функцій (сама функція та своя похідна за просторовою змінною). Врешті, виписується лінійне диференціальне рівняння 2-го порядку відносно розв'язку спектрального рівняння як функції спектрального параметра.

Ключові слова: Штурма–Ліувілля проблема; фотонний кристал; дисперсійне рівняння; Флоке–Блоха хвилі; двошарове періодичне середовище; розв'язок спектрального рівняння; спектральний параметр; похідна за спектральним параметром.

Бібліогр.: 18 назв.

ELECTRONIC COMMUNICATIONS ЕЛЕКТРОННІ КОМУНІКАЦІЇ

UDC 621.394.78

Analysis of digital interfaces data transmission in communication channels of computer systems / V.V. Dovhij, A.I. Terletsky, V.M. Hryha, I.V. Svyd // Radiotekhnika : All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2024. No 219. P. 112 – 123.

This work demonstrates that digital data transmission interfaces in communication channels of computer systems directly affect the speed and quality of data transmission. It provides an overview and analysis of the main encoding methods for synchronous and asynchronous data transmission, along with an example of encoding two bits of information using a quadrature-phase modulator. The text encoding system (IRA) and the American Standard Code for Information Interchange (ASCII) are analyzed. The main methods of data transmission in synchronous and asynchronous modes are reviewed, and their key characteristics, advantages, and disadvantages when used in data transmission interfaces in computer systems are identified. This article examines two of the most important interface types: V.24/EIA-232F and ISDN. This is demonstrated through an analysis of an information transmission system, with a detailed description of the equipment that can be used under specific conditions and requirements. The article also provides details on the use of different network configurations. The main principles of programming modems and multiplexers for digital information transmission using a digital communication channel for defined usage scenarios are also presented.

Key words: digital interface; data transmission; communication channel; evaluation; modem; multiplexer; duplex; simplex; programming; modulation; synchronous mode; asynchronous mode.

2 tab. 3 fig. Ref: 11 items.

УДК 621.394.78

Аналіз цифрових інтерфейсів передачі даних у каналах зв'язку комп'ютерних систем / В.В. Довгий, А.І. Терлецький, В.М. Грига, І.В. Свід // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2024. Вип. 219. С. 112 – 123.

Показано, що цифрові інтерфейси передачі даних у каналах зв'язку комп'ютерних систем безпосередньо впливають на швидкість та якість передавання даних. Проведено огляд та аналіз основних способів кодування при синхронній та асинхронній передачі даних. Показано приклад кодування двох бітів інформації при застосуванні квадратурно-фазового маніпулятора. Проаналізовано систему текстового кодування (IRA) та американський стандартний код для обміну інформацією (ASCII). Розглянуто основні методи передачі даних в синхронному та асинхронному режимі. Визначено їх основні характеристики та недоліки при застосуванні в інтерфейсах передачі даних в комп'ютерних системах. Розглянуто два найбільш важливі варіанти спряження: V.24/EIA-232F та ISDN. Це продемонстровано на прикладі аналізу системи передачі інформації з детальним описом і аналізом обладнання, що може бути використане за конкретних умов і потреб. Також наведено деталізацію особливостей використання для різних конфігурацій мережевого застосування. Наведено основні принципи програмування модемів та мультиплексорів при передачі цифрової інформації з використанням цифрового каналу зв'язку для визначених варіантів використання.

Ключові слова: цифровий інтерфейс; передача даних; канал зв'язку; оцінка; модем; мультиплексор; дуплекс; симплекс; програмування; модуляція; синхронний режим; асинхронний режим.

Табл. 2. Іл. 3. Бібліогр.: 11 назв.

RELATED PROBLEMS OF RADIO ENGINEERING СУМІЖНІ ПРОБЛЕМИ РАДІОТЕХНІКИ

UDC 37.046

Directions for implementing the graphic style of the Armed Forces of Ukraine in the design of an electronic multimedia training manual on tactical training / A.V. Biziuk, N.G. Zmiivska // Radiotekhnika : All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2024. No 219. P. 124 – 130.

The main problems of introducing a graphic style in the visual communication of the Armed Forces of Ukraine into the design of an electronic multimedia training publication on tactical training were analyzed: the use of single colors for the structural formations of the Armed Forces of Ukraine for the design of all types of military publications; application for the development of design and layout of all types of media exclusively of one (basic) font UAF Sans.

As a result of the conducted analysis, it was established that when developing the design of an electronic educational publication on tactical training, this approach does not fully meet the requirements for its compliance with the interests of the target audience and the connection with the subject matter of the material. Based on the experience of creating an electronic multimedia training manual "Tactical training (mechanized detachment)", a not quite successful

implementation of the literal approach, in terms of requirements for the graphic style of the Armed Forces of Ukraine, was demonstrated when creating the color scheme of the main screen.

The results of the research conducted by the team of marketers and designers of the dissident creative agency on the study of the psychology of color and its impact on consumers of different ages and genders are presented, which confirm the inconsistency of the established colors with the preferences of the target audience – young people, mainly males.

Ways to solve the problems of introducing the graphic style of the Armed Forces of Ukraine into the design of the electronic multimedia training manual "General Tactics (Mechanized Division)" are proposed, taking into account the topic of the publication and the interest of the target audience: using a combination of colors close in saturation to create a color gamut of the publication's screens (creating a contrast in saturation) "Uniform" and "Step" by the method of radial gradient filling of the background of the screens or the contrast of diametrically opposite colors: yellow, blue and green; application for emphasis when creating the typography of the basic communication font of the Armed Forces of Ukraine UAF Sans of various sizes and changing its drawings, creating italics using the features of the Figma program regarding the inclination of letters.

As a result of the study, based on the proposed approaches, created examples of the cover and the main screen of the educational publication are presented.

Keywords: effectiveness of training; electronic publication; design design; graphic style; target audience; color scheme; filling method; typography.

7 fig. Ref: 10 items.

УДК 37.046

Напрями впровадження графічного стилю Збройних Сил України в дизайн електронного мультимедійного навчального посібника з тактичної підготовки / А.В. Бізюк, Н.Г. Змівська // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2024. Вип. 219. С. 124 – 130.

Проаналізовано основні проблеми впровадження графічного стилю у візуальній комунікації Збройних Сил України в дизайн електронного мультимедійного навчального видання з тактичної підготовки: використання для оформлення усіх видів військових публікацій єдиних кольорів для структурних формувань Збройних Сил України; застосування для розроблення дизайну та верстки всіх видів носіїв виключно одного (базового) шрифту UAF Sans.

Встановлено, що при проектуванні дизайну електронного навчального видання з тактичної підготовки такий підхід не в повній мірі забезпечує вимоги щодо його відповідності інтересам цільової аудиторії та зв'язок з тематикою матеріалу. На основі досвіду створення електронного мультимедійного навчального посібника «Тактична підготовка (механізоване відділення)» продемонстровано приклад не досить вдалої реалізації буквального підходу, з точки зору вимог до графічного стилю Збройних Сил України, при створенні колірної гами головного екрану.

Наведено результати досліджень, проведених командою маркетологів і дизайнерів креативної агенції *dissident*, з вивчення психології кольору та його впливу на споживачів різного віку та статі, які підтверджують невідповідність встановлених кольорів уподобанням цільової аудиторії – молодь переважно чоловічої статі.

Запропоновано шляхи вирішення проблем впровадження графічного стилю Збройних Сил України в дизайн електронного мультимедійного навчального посібника «Загальна тактика (механізоване відділення)» з урахуванням тематики видання і зацікавлення цільової аудиторії: використання для створення кольорової гами екранів видання сполучення близьких за насиченістю кольорів (створення контрасту за насиченістю) «Мундир» і «Степ» способом радіальної градієнтної заливки фону екранів або ж контрасту діаметрально протилежних кольорів: жовтого, синього і зеленого; застосування для акценту при створенні типографіки базового шрифту комунікації Збройних Сил України UAF Sans різних розмірів та зміни його накреслень, створенням курсиву за допомогою можливостей програми Figma щодо нахилу літер.

Наведено приклади створених на основі запропонованих підходів обкладинки і головного екрану навчального видання.

Ключові слова: ефективність навчання; електронне видання; проектування дизайну; графічний стиль; цільова аудиторія; кольорова гама; спосіб заливки; типографіка.

Л. 7. Бібліогр.: 10 назв.

UDC 338.3

On the issue of substantiating mathematical models of technical and economic indicators of gas distribution systems under conditions of uncertainty / A. Paleyev, V. Kotukh, Y. Husieva, K. Paleyeva // Radiotekhnika : All-Ukr. Sci. Interdep. Mag. 2024. No 219. P. 131 – 137.

The issues of reliability of gas transportation systems and their functioning in conditions of uncertainty are very relevant today. This is due to the fact that in the last few years the political and economic situation in the country has changed significantly, the quantitative and qualitative composition of the population, and logistics routes have changed. There has also been a rapid growth in modern technology and equipment. Because of these factors, it is necessary to change the approach to the structure of the entire heat and power supply system as a whole, to the choice of energy carrier, as well as to the elements of gas transportation systems, for example, gas distribution systems. When solving these

problems, certain problems arise that are difficult or impossible to solve using traditional methods of optimization calculations.

One of the ways to reliably provide energy resources to end consumers is the decentralization of such systems, the construction of new ones, reconstruction and maintenance of the reliable functioning of individual elements and components. The purpose of this work is to consider ways to improve the efficiency of design, redesign and reconstruction of gas distribution systems and to substantiate mathematical models of technical and economic indicators of gas distribution systems under conditions of uncertainty.

The article explores the issue of determining the optimal construction sequence and the procedure for putting into operation a new system (or reconstruction of an existing system), in which the total costs during construction (reconstruction) would be minimal. At the same time, determining the priority of construction (reconstruction) of gas distribution systems should be carried out taking into account the characteristic features, including taking into account the directions and areas of consumer location, types and existing energy distribution schemes.

A mathematical model of the heat and power supply system for a certain territorial unit (region, settlement, district, etc.) or a single group of consumers is also given. Transportation of energy carriers is carried out through "logistics" points. This model allows for comparison of different (from the point of view of routing) schemes for providing a territorial unit with the same energy carrier, provided that they have different energy carriers.

The issues discussed in the article will make it possible to further improve the process of creating and operating models, methods and information technologies for monitoring the condition of gas distribution systems under conditions of uncertainty.

Keywords: gas distribution systems, energy carrier, technical and economic indicators, uncertainty.

1 fig. Ref.: 15 items

УДК 338.3

До питання обґрунтування математичних моделей техніко-економічних показників газорозподільних систем в умовах невизначеності / А.В. Палесєв, В.Г. Котух, Ю.Ю. Гусєва, К.М. Палєєва // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2024. Вип. 219. С. 131 – 137.

Зміни внутрішньо- та зовнішньополітичної та економічної ситуації спонукають до швидких змін в організації системи енергопостачання нашої держави, а отже, і до певної зміни підходів до питання організації функціонування газотранспортних систем (та їх окремих складових) на усіх етапах життєвого циклу.

Одним з актуальних шляхів надійного забезпечення енергоресурсами усіх груп кінцевих споживачів є децентралізація таких систем, спорудження нових, реконструкція і підтримання надійності функціонування окремих їх елементів та складових.

Розглядаються шляхи підвищення ефективності проектування, перепроєктування та реконструкції газорозподільних систем та обґрунтування математичних моделей техніко-економічних показників газорозподільних систем в умовах невизначеності. Наведено математичну модель системи теплоенергопостачання певної територіальної одиниці чи єдиної групи споживачів. Така модель допускає порівняння різних (з точки зору трасування) схем забезпечення будь-якої територіальної одиниці одним і тим саме видом енергоносія за умови наявності різних енергоносіїв.

Обґрунтування математичних моделей техніко-економічних показників газорозподільних систем дозволить в подальшому удосконалити процес створення та функціонування спеціальних моделей, методів та інформаційних технологій моніторингу стану газотранспортних систем в умовах невизначеності.

Ключові слова: газорозподільні системи; енергоносії; техніко-економічні показники; невизначеність.

Лл. 1. Бібліогр.: 15 назв.

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS
RADIOTEKHNIKA
Issue 219
In English and Ukrainian

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
РАДІОТЕХНІКА
Випуск 219
Англійською та українською мовами

Коректор Л.І. Сащенко

Підп. до друку 30.12.2024. Формат 60x90/8. Папір офсет. Гарнітура Таймс. Друк. ризограф.
Ум. друк. арк. 10,94. Обл.-вид. арк. 9,9. Тираж 300 прим. Зам. № 148. Ціна договір.

Харківський національний університет радіоелектроніки (ХНУРЕ)
Просп. Науки, 14, Харків, 61166.

Оригінал-макет підготовлено і збірник надруковано у ПФ „Колегіум”,
Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої діяльності до Державного реєстру видавців.
Сер. ДК №1722 від 23.03.2004.