

Національний університет  
“Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка”

National University  
“Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”

# СИСТЕМИ управління, навігації та зв'язку

# Control, navigation and communication systems

Випуск 4 (74)

Issue 4 (74)

## Щоквартальне видання

Засноване у 2007 році

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

### Засновник і видавець:

Національний університет  
“Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка”

### Телефон:

+38 (050) 302-20-71

### E-mail редколегії:

kuchuk\_nina@ukr.net

### Інформаційний сайт:

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

## Quarterly

Founded in 2007

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

### Founder and publisher:

National University  
“Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”

### Phone:

+38 (050) 302-20-71

### E-mail of the editorial board:

kuchuk\_nina@ukr.net

### Information site:

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

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

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

*Затверджений до друку Вченою Радою Національного університету*

*“Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка” (протокол від 12 грудня 2023 року № 13).*

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

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

Полтава • 2023

## Редакційна колегія

### Головний редактор:

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

### Заступники головного редактора:

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

### Члени редакційної колегії:

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

### Відповідальний секретар:

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

### Технічні секретарі:

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

## Editorial board

### Editor-in-Chief:

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

### Associates editor:

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

### Editorial board members:

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

### Responsible secretary:

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

### Technical secretaries:

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

# З М І С Т

## НАВІГАЦІЯ ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

<i>Засць А. Ю., Калініченко Є. В.</i> Аналіз сучасних методів та перспективи розвитку навігації підводних апаратів .....	5
<i>Зуєв А. О.</i> Метод синтезу безшовної текстурованої сфери для візуалізації у геоінформаційних та картографічних системах .....	12
<i>Калініченко Є. В., Постніков Є. Є.</i> Метод оцінювання структурної стійкості системи «буксирувальник – сейсмічне обладнання» при маневруванні .....	18
<i>Клюшніков І. М.</i> Метод визначення структури та складу мультиагентної системи моніторингу малих модульних реакторів побудованої на основі безпілотних літальних апаратів .....	22
<i>Мартовицький В. О., Янковський О. А., Коваленко А. А., Севостьянова О. М.</i> Архітектура програмно-апаратної моделі системи вимірювання кутів автоматичного радіопеленгатора .....	30

## АВТОМОБІЛЬНИЙ, РІЧКОВИЙ, МОРСЬКИЙ ТА АВІАЦІЙНИЙ ТРАНСПОРТ

<i>Замана А. А., Гусак І. Л.</i> Методика визначення критеріїв безпечної швидкості суден при експлуатації суден внутрішнім водним транспортом .....	34
---	----

## УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

<i>Barsov V., Ovdyyuk E.</i> Comparative analysis of the air flow velocity determination methods .....	40
<i>Боряк Б. Р., Дрючко О. Г., Ненич Д. О., Сухоребрий О. В.</i> Автоматизована система лінійної регуляції керованої величини з використанням ПД-регулятора .....	49
<i>Кононова О. А.</i> Автоматизація аналізу речовин із застосуванням п'єзореzonансних сенсорів .....	52
<i>Леві Л. І., Бороздін М. К., Зима О. Є.</i> Застосування нейромережевих технологій для ідентифікації коефіцієнта вологопровідності ґрунту .....	55
<i>Макогон Н., Serpukhov O., Rybak T., Tereshchenko O., Lavrut O., Sukhoteplyi V.</i> Battle planning and organization logistics support in the forms and methods of nato standards military management tools based on the use of the game theory mathematical apparatus .....	59
<i>Савченко Н. П., Трет'як А. В., Довгалик О. М.</i> Перспективи застосування мобільних електростанцій як джерел розосередженої генерації у локальних електричних мережах .....	63
<i>Vlasenkov D., Allakhveranov R., Starodubcev M.</i> Operational control of production processes under conditions of uncertainty .....	67

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Гавриленко С. Ю., Полторацький В. О.</i> Метод підвищення оперативності класифікації даних за рахунок зменшення кореляції ознак .....	70
<i>Дяченко В. О., Міхаль О. П.</i> Перспективність застосування вдосконаленого класичного алгоритму карт Кохонена у розподілених енергокритичних сенсорних мережах .....	75
<i>Єрмілова Н. В., Зоураб Ю. Р., Єрмілов Р. О.</i> Методики автоматичного розпізнавання складних об'єктів за формою .....	80
<i>Зуєв А. О., Караман Д. Г.</i> Програмна реалізація спеціалізованих алгоритмів генерації псевдовипадкових чисел на платформах для вбудованих систем .....	85
<i>Положий Д. С., Орехов О. О.</i> Інтелектуальні системи автомобільної безпеки на основі хмарних архітектур .....	91
<i>Рудницький В. М., Ларін В. В., Мельник О. Г., Підласий Д. А.</i> Дискретно-казуальне представлення моделей елементарних функцій і СЕТ-операцій .....	96
<i>Сердюков Д. В., Северінов О. В., Сидоренко З. М.</i> Особливості розгортання застосунку ESET MDM/MDC для забезпечення безпеки мобільних пристроїв .....	102
<i>Tyshchenko D., Franchuk T., Zakharov R., Karpunin I.</i> Innovation parks creation in the terms of the information space functioning .....	106
<i>Токарев В. В., Ільїна І. В., Шевченко І. І., Гриценко І. К.</i> Про один підхід до рішення асиметричної TSP - задачі при В2С доставках за допомогою платформи "Swarm-bot" - system у фізичному неорганізованому середовищі .....	110
<i>Харченко В. С., Івасюк О. О.</i> Використання методу верифікації FMEDA/FIT для оцінювання кібербезпеки програмовного логічного контролера .....	114
<i>Чалий С. Ф., Лециньський В. О.</i> Інформаційна технологія оцінки пояснень в інтелектуальній інформаційній системі .....	120
<i>Янко А. С., Краснобаєв В. А., Любченко Р. О., Сабельнікова П. С.</i> Процедура забезпечення відмовостійкості комп'ютерної системи на основі використання модулярної арифметики .....	125
<i>Andrusenko Y., Fesenko T.</i> Instability of cloud infrastructure resources and services .....	129
<i>Kuchuk N., Shyman A.</i> Synthesis of a computer network for controlling moving objects .....	134

Подорожняк А. О., Наймитенко С. І. Розробка та дослідження сервісу для розумного протезу верхніх кінцівок .....	137
---	-----

### ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

Болібрех Б. В., Козлітін О. О., Осадчий Д. Б. Акустичний та електромагнітний вплив коронних розрядів на стан виробничого середовища .....	143
Беліков А. С., Железняков Є. О. Визначення критичних умов мікроклімату та безпеки експлуатації систем теплопостачання при аварійних відключеннях теплопостачання .....	147

### ЗВ'ЯЗОК, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА

Воронець В. М., Пустовойтов П. Є. Модель вузла електронної комунікації, що обслуговує ТСП-трафік .....	152
Kapiton A., Talybov R., Dziuban O., Kanivets B. Analysis of methods for determining the quality of functioning of telecommunication systems .....	156
Нікітіна Л. О., Дженюк Н. В. Імерсивне навчання студентів у галузі телекомунікацій .....	160
Почерняев В. М., Магомедова М. С., Сивкова Н. М., Шеффер О. В. Кутовий рознесений прийом на лініях тропосферного та іоносферного зв'язку .....	167
Starodubcev M., Khrustalova S., Nevliudova V., Allakhveranov R. Optimisation of optical infocommunication networks .....	171

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК .....	176
---------------------------	-----

#### Організації авторів

Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна

Державний торговельно-економічний університет, Київ, Україна

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

Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

Київський фаховий коледж зв'язку, Київ, Україна

Криворізький фаховий коледж, Кривий Ріг, Україна

Науково-дослідний, проектно-конструкторський та технологічний інститут мікрографії, Харків, Україна

Національна академія Служби безпеки України, Київ, Україна

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, Україна

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

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

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

Національний університет «Львівська політехніка», Україна

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

Одеський національний морський університет, Україна

Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків, Україна

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

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

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля, Черкаси, Україна

Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

#### Authors affiliation

Military Institute of Tank Troops of National Technical University "KhPI", Kharkiv, Ukraine

State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine

SR Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment, Cherkasy, Ukraine

State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

Kyiv Professional College of Communication, Kyiv, Ukraine

Kryvyi Rih Professional College, Ukraine

Research, Design and Technology Institute of Micrography, Kharkiv, Ukraine

National Academy of Security Services of Ukraine, Kyiv, Ukraine

National Army Academy named after Hetman Petro Sahaidachnyi, Lviv, Ukraine

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

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

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

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

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

Odessa National Maritime University, Ukraine

V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl, Cherkasy, Ukraine

Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

# Навігація та геоінформаційні системи

УДК 629.123

doi: 10.26906/SUNZ.2023.4.005

А. Ю. Засць, Є. В. Калініченко

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

## АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ НАВІГАЦІЇ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ

**Анотація.** У цій статті проведено всеосяжний аналіз сучасних методів навігації автономних підводних апаратів, акцентуючи увагу на їхніх технологічних особливостях, перевагах та обмеженнях. Основна увага приділена п'яти ключовим методам: акустичній навігації, глобальним системам позиціонування, навігації за допомогою Доплерівського вимірника швидкості (DVL), інерціальній навігації, навігація з використанням спостерігачів траєкторії на основі дифузії, а також забезпечення навігації груп підводних апаратів. Результати дослідження вказують на те, що інтеграція різноманітних методів навігації може значно покращити надійність та точність позиціонування підводних апаратів, забезпечуючи ефективне виконання місій у складних умовах. Враховуючи поточні тенденції розвитку технологій та оперативних вимог, в статті також окреслено напрями подальших досліджень та розробок у галузі підводної навігації.

**Ключові слова:** автономні підводні апарати, акустична навігація, Long Baseline, Ultra Short Baseline, Short Baseline, фільтр Калмана, Doppler Velocity Log, алгоритм для інтегрованої навігації NARX-RKF, навігація методом навігаційного числення та інерціальні навігаційні системи.

### Вступ

Протягом останніх десяти років розробка комерційно доступних, точних, датчиків навігації з високою частотою оновлення, таких як Доплерівські сонари, оптичні гірокомпаси та блоки інерційного вимірювання (IMU), доповнила традиційні підводні сенсори, такі як акустичні позиціонувальні системи, магнітні компаси та датчики глибини за тиском. Дані з цих сенсорів, разом з даними від наукових датчиків, таких як батиметричні сонари та оптичні камери, стали каталізатором для розробки нових методологій навігації. Багато з цих методологій доповнюють дані сенсорів інформацією з динамічних або кінематичних моделей.

Мотивація для вдосконалення навігації підводних транспортних засобів виникає з необхідності розширити можливості цих засобів і додатково збільшити їх цінність для океанографії.

Майбутні вдосконалення в навігації підводних транспортних засобів дозволять нам оптимізувати інфраструктуру, необхідну для навігації, та дозволять підводним апаратам оптимально досягати конкретних цілей. Ці поліпшення збільшать цінність, кількість та вартісну ефективність наукових даних, отриманих за допомогою цих транспортних засобів.

**Мета статті** – проаналізувати переваги та недоліки сучасних методи навігації автономних підводних апаратів та їх груп з використанням у тому числі нейронних мереж і визначити перспективи їх розвитку.

### Основний матеріал

1. **Методи акустичної навігації** продовжують використовуватися і сьогодні. Long Baseline (LBL),

при якій транспортний засіб триангулює своє положення від акустичних діапазонів у мережі обстежених передавачів, та навігація з ультракороткою базовою лінією (USBL), де використовується сонарний масив для визначення діапазону та напрямку до транспортного засобу, регулярно використовуються сьогодні.

**1.1 Зовнішні акустичні системи.** Зовнішні акустичні системи позиціонування використовуються підводними транспортними засобами для триангуляції їхнього положення на основі лише дальності або інформації про напрямок і дальність між зовнішніми акустичними транспондерами та передавачем, встановленим на транспортному засобі. Основна перевага цих систем полягає в тому, що вимоги до розміру та енергоспоживання підводного транспортного засобу мінімальні порівняно з іншими навігаційними методами. Однак, на відміну від інших навігаційних методів, деякі з зовнішніх акустичних систем вимагають розгортання акустичних транспондерів на морському дні в районі операцій [1].

У зовнішній акустичній системі транспортний засіб обчислює свою відстань до кожного транспондера, використовуючи час польоту акустичного сигналу та оцінку швидкості звуку в водному стовпі між транспортним засобом і транспондером. Наявність інформації про напрямок залежить від геометрії мережі акустичних транспондерів. Для зовнішніх акустичних навігаційних систем використовуються три різних основних геометрії: Short Baseline (SBL), Ultra Short Baseline (USBL) та Long Baseline (LBL) [2].

Всі типи зовнішніх акустичних систем позиціонування зіткнулися з деякими загальними викликами. Однією з таких проблем є досягнення сумісності систем координат між усіма вимірами. Орієнтація

датчика, положення транспортного засобу та положення корпусу для передавачів, встановлених на корпусі, усі впливають на трансформації систем координат. Наступні дискусії про різні геометрії навігаційних систем передбачають, що відповідні трансформації координат були проведені, щоб розрахувати положення транспортного засобу в загальній системі координат. Найбільш фундаментальною проблемою навігації підводного транспортного засобу є ефективне відхилення викидів та помилкових повернень. Дійсні акустичні передачі можуть викликати складні многодоріжжкові сценарії, тоді як алгоритми навігації розроблені на основі передположення про прямолінійну передачу [3].

**1.2 Short Baseline (SBL).** Перший розроблений зовнішній акустичний системний тип був системою позиціонування акустичною короткою базовою лінією (SBL), яка використовувалась для слідування чи навігації підводних апаратів на короткі відстані. Ці системи включають в себе один транспондер або перетворювач, який монтується на підводному апараті, і акустичну мережу, яка зазвичай монтується на корпусі господарського судна. Акустична мережа складається з комбінації трьох або більше акустичних перетворювачів, гідрофонів та транспондерів, які монтуються на корпусі корабля, щоб досягти максимально можливого геометричного розділення, яке зазвичай становить від 10 до 20 метрів, як показано на рисунку 2. Геометрія акустичної мережі, що монтується на корпусі, повинна точно обстежуватися під час початкового встановлення системи [4]. У конфігурації слідування, запущеного судном, транспондер монтується на підводному апараті, і мережа SBL зазвичай включає в себе один або два перетворювачі та кілька гідрофонів. Один перетворювач в акустичній мережі опитує транспондер на апараті, і всі елементи в акустичній мережі отримують відповідь транспондера. Далі розраховуються відстані між апаратом та кожним елементом акустичної мережі і використовуються для визначення позиції апарату.

Для автономної навігації підводного апарату геометрія інвертується, так що один перетворювач розташований на автономному підводному апараті (AUV), а акустична мережа складається з транспондерів. Хоча акустична мережа часто монтується на корпусі, були розроблені системи, в яких акустична мережа монтується в відомій геометрії на розгортній рамці також. У цій конфігурації AUV опитує акустичну мережу та розраховує свою власну оцінку позиції відносно місця розташування акустичної мережі. Щоб AUV визначив свою глобальну позицію, акустична мережа транспондерів повинна залишатися на фіксованому місці або її місцезнаходження під час кожного опитування повинно передаватися AUV через акустичний зв'язок.

**1.3 Ultra Short Baseline (USBL).** У 1970-х роках були розроблені системи навігації з ультракороткою базовою лінією (USBL) як спрощена альтернатива системам SBL. Ці системи USBL можуть працювати від підводного апарату або його головного судна. Системи USBL, що працюють від AUV (автономного підводного апарату), які іноді називають інвертованими

системами USBL, дозволяють AUV орієнтуватися відносно місця розташування єдиного зовнішнього акустичного транспондера [5].

Якщо транспондер монтується на корпусі господарського судна, AUV орієнтується відносно позиції господарського судна. Якщо транспондер монтується на дні із відомими геодезичними координатами, апарат може орієнтуватися за справжніми координатами.

Системи, які працюють від головного судна, використовуються для слідування або навігації дистанційно керованих апаратів. Ці системи головного судна можуть забезпечити навігацію в глобальних координатах завжди, коли місцезнаходження цього судна може бути точно визначено за допомогою GPS. У цьому сценарії єдиний акустичний транспондер прикріплений до підводного апарату, а масив акустичних перетворювачів розташований на головному судні. Системи USBL, які працюють на частотах порядку 100 кГц, можуть використовуватися для навігації на короткі відстані порядку 100-500 м. Також існують системи для глибокого моря, які ефективні до 6000 м і працюють на частотах від 14,5 до 17,5 кГц. [4, 5]

Основна відмінність між USBL та іншими типами акустичних систем позиціонування полягає в тому, що USBL використовує різниці у фазах акустичних сигналів, отриманих різними датчиками перетворювача, для визначення азимуту до транспондера, а також дальності. Оскільки датчики перетворювача мають точно відому геометрію, різниця у фазах між сигналами, отриманими різними датчиками, може використовуватися для розрахунку механічного кута падіння. Цей механічний кут падіння, у свою чергу, може використовуватися для розрахунку азимуту між транспондером та масивом перетворювача. В залежності від конкретної системи, яка використовується, позицію підводного апарату можна потім оцінити відносно господарського судна або зовнішнього акустичного транспондера, використовуючи інформацію про азимут та дальність.

**1.4 Long Baseline (LBL).** На принципі, системи навігації з довгою базовою лінією (LBL) схожі на обертнені системи SBL, але відрізняються тим, що зовнішні транспондери розгортаються окремо в океані, а не монтовані на корпусі господарського судна чи розгортаному каркасі. Явна наслідок цієї різниці полягає в тому, що геометрія мережі транспондерів не відома завчасно і потребує визначення на місці. Типові системи LBL розгортають між чотирма і дванадцятьма акустичними транспондерами в залежності від завдань, хоча можуть працювати і з двома транспондерами. Щоб транспортний засіб міг навігуватися в глобальній системі координат, потрібно визначити та передати до підводного транспортного засобу глобальні розташування маяків. [6] Існують самокалібруючі маяки, які можуть визначати своє положення відносно одного іншого. Ці маяки дорожчі, але вони зменшують час опитування, тому що потрібні лише достатні дані опитування для фіксації каліброваної мережі в глобальних координатах.

Акустичні транспондери розгортаються з господарського судна у районі майбутніх операцій підводного транспортного засобу, а потім геометрія масиву

транспондерів калібрується шляхом «опитування» розташування кожного транспондера. Ця калібровка здійснюється шляхом послідовного опитування кожного транспондера трансдуктором, розташованим на корпусі господарського судна. Господарське судно пересувається в різні місця, опитує транспондери, а потім використовує точні дані про розташування корабля з координат GPS у поєднанні з розрахованим діапазоном до кожного транспондера, щоб глобально розташувати транспондери.

Це калібрування, або «опитування», мережі транспондерів часто є найбільшим джерелом помилок в системах навігації LBL [3, 6].

Після отримання даних з тривимірної мережі транспондерів, розташування кожного з транспондерів передається підводному транспортному засобу. Транспортний засіб навігується шляхом періодичного отримання даних (опитування) транспондерів та розрахунку діапазонів до кожного маяка на основі часу польоту процесу опитування. Зазвичай транспортний засіб опитує всі маяки на одній основній частоті, і вони відповідають на унікальній частоті. Для цього використовується найкраща оцінка швидкості звуку у воді, помножену на половину часу польоту для кожного маяка, щоб розрахувати діапазон до цього маяка.

Системи LBL були розроблені з використанням різних діапазонів частот для виконання різних завдань. Хоча основні принципи та спосіб роботи є ідентичними, варіація в акустичних сигналах частот дозволяє різні рівні точності на різних ефективних діапазонах операцій. Типові високочастотні системи працюють приблизно на рівні 300 кГц, тоді як низькочастотні системи працюють приблизно на рівні 12 кГц.

Залежно від кількості діапазонів, доступних в кінці кожного циклу опитування, позиція транспортного засобу розраховується різними способами. Інформація про глибину від датчиків на борту транспортного засобу та транспондерів використовується для зменшення проблеми триангуляції до двовимірної горизонтальної площини. Якщо доступні діапазони лише від двох зовнішніх транспондерів, транспортний засіб розраховує дві точки перетину діапазонів кола від цих транспондерів. Використовуючи завчасне знання про те, з якого боку базової лінії транспондера він розташований, транспортний засіб може визначити, яке з двох можливих рішень представляє його поточне положення. Три або більше діапазонів транспондера дозволяють транспортному засобу унікально визначити його положення за допомогою методу найменших квадратів. [4]

Після того, як позиція транспортного засобу була «триангульована» за допомогою діапазонів від транспондерів LBL, транспортний засіб розраховує свій маршрут мертвого відліку до наступного набору діапазонів LBL. Після кожного циклу опитування позиція транспортного засобу визначається та використовується для повторного ініціалізації маршруту мертвого відліку. Швидкість оновлення, з якою може бути повторно ініціалізована система, обмежена швидкістю звуку у воді, яка дорівнює приблизно 1500

метрів за секунду у воді. Інтеграція інформації з DVL у рішення мертвого відліку показала значне покращення частот навігації LBL, особливо в низькочастотних налаштуваннях із повільними швидкостями оновлення. Ця система використовує доповнювальні лінійні фільтри для комбінування фіксацій LBL з низьким пропусканням, які є шумними, але глобально точними, з фіксаціями позиції Доплера, які є точними протягом коротких періодів. [7]

Альтернативний обчислювальний алгоритм для навігації AUV за допомогою системи LBL використовує фільтр Калмана (KF). Фільтр Калмана комбінує інформацію від бортових датчиків та завчасне знання про неточності цих датчиків із динамічною моделлю простору стану загальної системи для надання даних про стан у реальному часі. [8] Позиція транспортного засобу спочатку визначається так, як описано вище, але оновлення оцінки позиції обчислюються за допомогою обережного застосування KF. Оскільки рух підводного транспортного засобу є нелінійним, замість цього використовується розширений фільтр Калмана (ЕКФ). Проте основне обмеження використання будь-якого виду фільтра Калмана з системами навігації LBL пов'язане з характером шуму в системі LBL. Систематичні помилки в типовій конфігурації LBL включають невизначеність швидкості води; початкові помилки обстеження позиції бакенів; рух бакенів через течії; акустичні многодоріжкові шляхи; втрата прямого акустичного шляху; та погані співвідношення сигнал/шум через машинний та електромагнітний шум. Тому деякі з отриманих LBL корекцій є неточними з великими, негауссівськими помилками. Ці негауссівські помилки порушують основне припущення алгоритмів фільтра Калмана, що системний шум є гауссівським. В кінці операцій підводного транспортного засобу в районі, акустичні транспондери повинні бути повернуті. Зазвичай більшість морських транспондерів включає акустичний реліз. Коли конкретний кодований акустичний сигнал відправляється до транспондерів, важений

Міцний трос відпускається, і акустичний транспондер піднімається до поверхні для вилучення. Незважаючи на витрати та час, необхідний для обробки акустичних транспондерів, системи навігації LBL залишаються стандартом для дешевих операцій транспортних засобів у глибокому океані.

**2. Навігація за допомогою Доплера (Doppler Velocity Log).** Розробка високочастотних багатолучевих сонарів Доплера, які забезпечують вимірювання швидкості дна з точністю 0,3% або менше та швидкістю оновлення до 5 Гц, надає дослідникам вимірювання швидкості для навігації біля дна (18–100 м). Це дозволило розробити багато технік навігації на основі Доплера, у тому числі і для поліпшення оцінок стану в інерціальних навігаційних системах (INS) [8].

Doppler Velocity Log (DVL) використовуються в різноманітних підводних апаратах, включаючи автономні підводні судна (AUV), підводні роботи (ROV) та підводні глайдери та є ключовим інструментом для підводних апаратів, який вимірює швидкість відносно морського дна або водної колони, використовуючи ефект Доплера. Вони дозволяють підводним

апаратам здійснювати точну навігацію під водою, де GPS сигнали не доступні. Принцип роботи DVL полягає у випромінює акустичні хвилі (або пучки) у різних напрямках, зазвичай вниз до дна або по водній колоні [9]. Акустичні хвилі відображаються від частинок у воді або морського дна і повертаються до DVL. Коли апарат рухається, частота повернутих акустичних хвиль змінюється через ефект Доплера. DVL вимірює цю зміну частоти між випроміненими та повернутими хвилями, що дозволяє DVL обчислити швидкість руху апарату відносно дна або водної колони. Більшість DVL мають кілька пучків, які випромінюються під різними кутами для обчислення швидкості у трьох вимірах.

**2.1 Алгоритм для інтегрованої навігації NARX-RKF (Nonlinear AutoRegressive with eXogenous input model with Robast Kalman Filter).** Згідно з аналізом [10], навігаційні параметри взаємопов'язані між собою, а зміщення датчика тісно пов'язане з зовнішнім середовищем та станом руху. Помилки Strapdown Inertial Navigation System (SINS) змінюються за конкретними законами, і помилка статусу навігації сильно корелює з інформацією історії переміщень. Це відповідає характеристикам моделі прогнозування часових рядів, тому використовується модель прогнозування часових рядів для прогнозування виводу DVL. Внутрішню модель помилки інерційного пристрою можна отримати шляхом навчання нейронної мережі. Для цього використовується модель прогнозування на основі мережі NARX. Коли інформація про швидкість виводу DVL є нормальною, інформацію, отриману від рішення SINS, та інформацію про вивід DVL можна використовувати для навчання моделі [11].

У режимі навчання моделі, коли DVL доступний, використовується набір даних, вимірних блоками інерційного вимірювання (IMU), для двоканального рішення. Іншими словами, SINS виводить два набори незалежних даних через рішення двох незалежних каналів. Після надання початкової навігаційної інформації рішення повністю залежить від інерційних даних IMU.

NARX-RKF включає модуль прогнозування несправності DVL на основі моделі NARX та інтегроване навігаційне кільце RKF.

NARX може використовувати інформацію про вивід інерційної навігації для прогнозування виводу, коли DVL переривається, та використовувати RKF для інтегрованої навігації [12].

**3. Інерціальна навігація.** Блоки інерційного вимірювання (IMU) надають чудові можливості для навігації без зовнішніх опор, але їх споживана потужність (від 12 до 30 В) та вартість (часто більше ніж \$100,000 США) до недавнього часу обмежували їх поширене використання у цивільних океанографічних засобах. Зазвичай IMU використовують для вимірювання швидкості Доплера та вимірювання положення з GPS або акустичних систем навігації для корекції помилок у вимірюваннях IMU. IMU часто використовують у високоточних обстеженнях та коли засоби запускаються під льодовими шапками або у середній глибинній зоні [4].

### 3.1 Навігація методом навігаційного числення та інерціальні навігаційні системи

Навігація методом навігаційного числення (dead reckoning – DR) та інерціальні навігаційні системи (INS) є базовими навігаційними методами. У обох цих системах транспортний засіб отримує початкове положення, а потім використовує інформацію від бортових сенсорів для постійного оновлення оцінки свого положення. Оскільки позиція транспортного засобу не ініціалізується протягом підводних операцій, помилки в оцінці позиції накопичуються протягом місії. Ці помилки виникають з різних джерел, таких як власна помилка бортових сенсорів, та зовнішніх екологічних сил, які не адекватно спостерігаються сенсорами, використовуваними у відповідній навігаційній системі. [4]

У навігації методом DR швидкість транспортного засобу інтегрується відносно часу, щоб оцінити шлях руху транспортного засобу. Найбільш примітивні системи методом DR оцінюють швидкість, використовуючи апріорні калібрування швидкості гвинта проти швидкості води транспортного засобу. Цей метод генерує лише наближену оцінку передової швидкості, не враховуючи впливи течій чи зсуву. На практиці ці системи не прийнятні для повільних транспортних засобів, таких як AUVs. Тому навігаційні системи включають точні вимірювання швидкості, такі як ті, що отримані з Doppler Velocity Logs (DVL), які вимірюють швидкість транспортного засобу відносно морського дна або водного потоку чи струменю [9].

Аналогічно, у базових системах DR курс може бути визначений тільки магнітним компасом. Проте магнітні компаси можуть бути піддані великим змінним помилкам, особливо біля морського дна, де підводні об'єкти можуть спричинити відхилення курсу компаса від магнітного півночі. Тому гіроскопічні компаси включені в системи DR для покращення точності вимірювань курсу.

Подальше удосконалення концепції навігації навігаційного числення - це інерціальна навігаційна система (INS), яка зазвичай включає інерціальний блок руху/вимірювань із алгоритмом Калмана. Вимірювання прискорення транспортного засобу з інерціального блоку руху інтегруються двічі відносно часу, щоб отримати швидкість транспортного засобу. Алгоритм Калмана - це управляючий алгоритм, який потім включає знання попереднього положення транспортного засобу, вхідні дані сенсора та динамічну модель системи для оцінки поточного положення транспортного засобу.

Основна проблема використання систем навігації DR або INS як єдиного методу навігації підводного транспортного засобу полягає в тому, що помилка оцінки положення постійно збільшується з часом і відстанню.

У поверхневих операціях, коли транспортний засіб може періодично виходити на поверхню і повторно ініціалізувати навігаційну систему за допомогою даних від Глобальної системи позиціонування (GPS), дешеві системи INS можуть бути дуже ефективними. Проте для глибоководних операцій часте виходження



на поверхню для ініціалізації системи не є можливим. Хоча існують дуже точні системи навігації на основі INS, їх завищена вартість, розмір та потреби у живленні традиційно робили їх абсолютно непридатними для малих, недорогих транспортних засобів. Прогрес в технології компонентів продовжує знижувати вартість та розмір високоточних систем навігації INS, але, на сьогоднішній день, зовнішні акустичні системи позиціонування залишаються стандартом для наукових місій на малих, недорогих підводних транспортних засобах

**4. Глобальна система позиціонування** Глобальні системи позиціонування (ГСП або GNSS - Global Navigation Satellite Systems) використовують сигнали від супутників, які обертаються навколо Землі, для визначення географічного положення об'єкта на поверхні Землі [13]. Найбільш відомою і розповсюдженою ГСП є GPS (Global Positioning System). Сигнали GPS у радіочастотному діапазоні блокуються морською водою, тому сигнали GPS не можуть безпосередньо прийматися глибоко зануреними океанічними засобами. Проте GPS часто допомагає ряду технік навігації підводних транспортних засобів, включаючи обстеження акустичних передатчиків, корекцію положення для IMU, калібрування вирівнювання сонарів Доплера та поверхневі системи LBL. ГСП базуються на супутниках, які посилають специфічні радіосигнали. Кожна система має велику кількість супутників, що забезпечують покриття всієї поверхні Землі. Обладнання має приймач, який "ловить" сигнали від чотирьох або більше супутників. Використовуючи час відправки, час прийому та відому позицію супутника, приймач може визначити свою точну географічну позицію (широта, довгота та висота). Сучасні комерційні системи можуть забезпечити точність позиціонування від 3 до 10 метрів. Спеціальне обладнання та корекційні сигнали можуть покращити цю точність до декількох сантиметрів.

**5. Навігація з використанням спостерігачів траєкторії на основі дифузії.** У цій статті представлено підхід для оцінки траєкторії підводного апарату, використовуючи головним чином гіродоплерівські вимірювання (вимірювання швидкості) та систему акустичного позиціонування (горизонтальне положення). Метод заснований на використанні дифузійних спостерігачів, які, на відміну від традиційних спостерігачів стану, здатні обробляти цілі сегменти траєкторії системи за раз [14]. Таким чином, вони будуть називатися спостерігачами траєкторії. Як видно, однією з головних переваг такого підходу є те, що, на відміну від інших досліджень з навігації, багато труднощів, пов'язаних із комбінацією доплерівського гіроскопа/USBL (різні швидкості інформації, дрейф доплерівського гіроскопа, виходи, збої в системі акустичного позиціонування тощо), розглядаються дуже просто, починаючи з тих самих основних рівнянь, таким чином ведучи до досить єдиного погляду на проблему. Ще одна суттєва перевага методу полягає в тому, що структура диференціальних рівнянь із частинними похідними (PDE), у яку він вбудований, дозволяє проводити

суворе практичне та теоретичне дослідження, оскільки доступно багато математичних інструментів для вирішення важливих питань, таких як стабільність, надійність, реалізація, а метафора дифузії використовується в усьому документі дозволяє підтримувати алгоритмічний опис у відносно простій, інтуїтивно зрозумілій та компактній формі.

## **6. Використання асинхронних ГАНС для забезпечення навігації груп AUV**

**6.1. Поширення рішенням навігації груп AUV вважається використання асинхронної LBL з донними або поверхневими маяками-відповідачами (МВ).** Даний метод навігації ґрунтується на вимірюванні часу відгуку маяка відповідача на вихідний від підводного апарату сигнал. Передбачається, що в акваторії на відстані не більше 10-15 кілометрів від підводного апарату є набір МВ (не менше 2), шляхом триангуляції отриманих часових затримок відгуку від маяків відповідачів встановлюється відстань від МВ до AUV. При цьому кількість МВ істотно покращує точність визначення місцезнаходження AUV.

При реалізації такого підходу для навігації груп AUV виникає проблема, при якій необхідно із заданою оптимальною періодичністю надавати гідроакустичний канал зв'язку кожному AUV, що входить до групи, для визначення свого місцеположення. Що по черзі призводить до істотного затягування процесу навігації окремого підводного апарату. При цьому також виникають проблеми при необхідності додавання нового AUV до складу існуючої групи. Оскільки доводиться виділяти нове часові вікно для нового підводного апарату.

У роботі [15] розроблена комплексна система підводного позиціонування і зв'язку для управління кількома автономними підводними апаратами. Вона складається з напівзануреного автономного надводного апарату як ретрансляційної системи позиціонування і зв'язку на рухомій поверхні, телеуправління безпілотного підводного апарату як ретрансляційної системи підводного зв'язку та LBL для індивідуальної орієнтації AUV (три надводних буя). Час випромінювання синхронізовано із сигналом системи динамічного позиціонування. AUV у зоні дії трьох буїв можуть приймати три сигнали передавача за допомогою встановленого гідрофона та розраховувати своє місцеположення за різницею у часі прийнятих сигналів, на додачу до даних їхнього датчика глибини.

**6.2. Алгоритм вирішення навігаційного завдання для групи AUV в рамках проекту THESAURUS** використовує дані від USLB і ґрунтується на фільтрі Калмана (ФК) з урахуванням особливостей організації мережевого зв'язку. Відносно єдиної станції морського дна AUV можуть оцінювати своє місцезнаходження без необхідності використання високошвидкісної інерціальної навігаційної системи або труднощі калібрування. Метод підходить для автономних підводних апаратів, оскільки не вимагає жодної іншої зовнішньої допомоги, крім єдиної станції морського дна. Основна ідея полягає в використанні взаємних акустичних вимірювань між транспортним засобом і єдиною станцією

морського дна. Принцип дії простий: AUV починає з акустичного опитування єдиної станції морського дна і вимірює відстань між двома блоками, а також пеленг єдиної станції морського дна відносно AUV в системі відліку AUV; потім, єдина станція морського дна обчислює пеленг AUV відносно себе і передає цю інформацію назад в AUV за допомогою аналогічного акустичного пристрою.

Об'єднуючи цю інформацію та вводячи її в структуру нелінійного фільтра, який включає вимірювання швидкості руху AUV по землі та кутової швидкості ризику, AUV обчислює оцінки свого положення та курсу. Ефективність методу була перевірена за допомогою моделювання, заснованого на результатах експерименту.

### **7. Алгоритми організації групової навігації, засновані на використанні інформації про дистанції між AUV всередині групи.**

Існує AUV лідер, який визначає своє місцезнаходження з високою точністю. Інші апарати у групі визначають своє положення на основі обчислення з використанням бортових навігаційних датчиків і уточнюють його на основі даних про відстані до апарата лідера. У статті [16] описана ГАНС з мобільною базою. У даному випадку декілька дорогих AUV, оснащених високоточною навігаційною системою, виконують роль маяків для інших більш простих та дешевих AUV.

Аналогічна ідея описана в роботі [17], в якій у місії брали участь два типи апаратів: дорогий з навігаційною системою високої точності та дешевий з навігаційною системою низької точності. Треба було за допомогою гідроакустичних модемів забезпечити навігацію дешевих апаратів з точністю дорогих апаратів. При вирішенні завдання було здійснено порівняння методу триангуляції з ФК, де фільтр Калмана показав вищу точність оцінювання місцезнаходження підводних апаратів.

У статті [18] запропоновано єдиний метод спільної навігації провідного і проведеного AUV, який в основному фокусується на плануванні оптимального шляху провідного AUV методом різниці в часі, за умови, що шлях проведеного AUV було заплановано. Спочатку встановлюється модель спільної навігації з декількома AUV і аналізується спостережувана проблема системи. По-друге, для єдиної системи спільної навігації AUV провідний-проведений створена базована на процесі прийняття рішень Маркова модель спільної навігації з декількома AUV, і розроблений метод планування шляху провідного AUV на основі методу різниці в часі. Алгоритми нелінійного розширеного фільтра Калмана і нелінійної фільтрації фільтра Калмана застосовуються для моделювання та перевірки алгоритму, запропонованого в цій статті. Результати показують, що теоретичну помилку позиціонування проведеного AUV можна регулювати приблизно до 3,2 м, плануючи траєкторію провідного AUV з використанням методу різниці в часі. Цей метод може не тільки зменшити помилку спостереження та помилку позиціонування проведеного AUV протягом всього процесу спільної навігації, але також підтримувати відносну відстань

вимірювання між провідним AUV та проведеним AUV в відповідному діапазоні.

### **Висновки**

Останнє десятиліття прогресу в технології та алгоритмах підводної навігації значно покращило існуючі методи навігації та, більше того, призвело до зовсім нових методів навігації. Оскільки дослідження у сфері навігації розвивається, щоб відповісти на ці виклики, інновації у цій сфері забезпечуватимуть нові завдання для підводних транспортних засобів, які раніше вважалися непрактичними або нездійсненними:

- покращення навігації біля дна. Хоча точність та частота оновлення багатьох технік навігації біля дна достатні для динамічного позиціонування, ці характеристики все ще поступаються тим, що є у високороздільних наукових сенсорах. Додаткові покращення в навігації біля дна допоможуть заповнити цей розрив та, в результаті, дозвлять вченим більш повно використовувати наукові дані про процеси біля дна;

- навігація з декількома транспортними засобами Завдяки досягненням у сфері акустичних модемів та технік навігації з одностороннім часом подорожі, дослідники можуть розглядати методології навігації, які використовують дані з декількох транспортних засобів. У таких техніках транспортний засіб використовує інформацію про стан і сенсори інших транспортних засобів, додатково до даних, які він має від власних сенсорів та систем навігації. Розгортання декількох транспортних засобів на місцях наукового інтересу (наприклад, термокліни або гідротермальні виходи) разом із покращеними техніками оцінки стану навколишнього середовища та навігації значно підвищує нашу здатність ефективно проводити пошук, локацію та вивчення наукових процесів. Можливість транспортних засобів працювати в одному регіоні та обмінюватися інформацією може дозволити зменшити витрати ресурсів (наприклад, LBL-транспондери, високороздільні батиметричні зонди, гіроскопи), необхідні для дослідження океану. Ці досягнення значно підвищать наші можливості використовувати підводні транспортні засоби в океанографії і, можливо, змінять стратегії дослідження океану.

- навігація в середньозоні Тривимірною навігацією по поверхні була успішно вирішена за допомогою GPS, а також доплерових сонарів і навігації за орієнтирами в значній мірі покращили навігацію поблизу дна. Проте акустичні системи часу польоту та інерціальні вимірювальні пристрої (IMU) є єдиними ефективними сенсорами для вимірювання стану XY в середній зоні глибин (водяний шар подалі від поверхні моря та подалі від дна моря). Це обмежує нашу здатність до точної навігації в цьому регіоні океану. На даний момент ці техніки є достатніми для океанографічних досліджень, однак постійне збільшення інтересу до кількісної біологічної та фізичної океанографії в середній зоні глибин стимулює розробку вдосконалених систем навігації. Обмежена кількість вимірювань сенсорів, доступних на цих глибинах, передбачає важливу роль модельних оцінювачів стану в цих досягненнях.

У випадку, коли транспортні засоби працюють в середній зоні глибин одночасно з транспортними засобами, які працюють близько до поверхні або біля дна, досягнення у сфері навігації декількома транспортними засобами можуть сприяти поліпшенню навігації в цих умовах.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kinsey J. C. A survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges / James C. Kinsey, Ryan M. EUSTICE, Louis L. Whitcomb // IFAC conference of manoeuvring and control of marine craft. – 2006. – P. 1–12.
2. Smallwood D. A. A new hydrodynamics test facility for UUV dynamics and control research / D. A. Smallwood, J. C. Kinsey, L. L. Whitcomb // Proceedings of IEEE/MTS Oceans. – 2003. – P. 356–361.
3. Bingham B. Hypothesis Grids: Improving Long Baseline Navigation for Autonomous Underwater Vehicles [Electronic resource] / B. Bingham, W. Seering // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2006. – Vol. 31, no. 1. – P. 209–218. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/joe.2006.872220>.
4. Inzartsev A. Underwater Vehicles / Alexander Inzartsev. – London: Intechopen, 2009. – 596 p.
5. USBL Integration and Assessment in a Multisensor Navigation Approach for AUVs 1 This work is partially supported by Ministry of Economy and Competitiveness under contracts TIN2014-58662-R, DPI2014-57746-C3-2-R and FEDER funds. [Electronic resource] / Eric Guerrero Font [et al.] // IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Vol. 50, no. 1. – P. 7905–7910. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.754>.
6. Dubrovin F. Navigation for AUV, located in the shadow area of LBL, during the group operations / Fedor Dubrovin // Global Oceans 2020: Singapore–US Gulf Coast. IEEE. – 2020. – P. 1–6.
7. Leonard J. J. Autonomous underwater vehicle navigation / John J. Leonard, Alexander Bahr // Springer handbook of ocean engineering. – 2016. – P. 341–358.
8. Wang Q. System noise variance matrix adaptive Kalman filter method for AUV INS/DVL navigation system [Electronic resource] / Qiuying Wang, Kaiyue Liu, Zhongyi Cao // Ocean Engineering. – 2023. – Vol. 267. – P. 113269. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113269>
9. An experimental comparison of Deep Learning strategies for AUV navigation in DVL-denied environments [Electronic resource] / Edoardo Topini [et al.] // Ocean Engineering. – 2023. – Vol. 274. – P. 114034. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114034>
10. An INS/GNSS integrated navigation in GNSS denied environment using recurrent neural network [Electronic resource] / Haifa Dai [et al.] // Defence Technology. – 2020. – Vol. 16, no. 2. – P. 334–340. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.08.011>
11. A SINS/DVL Integrated Positioning System through Filtering Gain Compensation Adaptive Filtering [Electronic resource] / Xiaozhen Yan [et al.] // Sensors. – 2019. – Vol. 19, no. 20. – P. 4576. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/s19204576>
12. Navnet: AUV Navigation Through Deep Sequential Learning [Electronic resource] / Xin Zhang [et al.] // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 59845–59861. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2982272>
13. Petritoli E. High Accuracy Attitude and Navigation System for an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) [Electronic resource] / Enrico Petritoli, Fabio Leccese // ACTA IMEKO. – 2018. – Vol. 7, no. 2. – P. 3. – Mode of access: [https://doi.org/10.21014/acta\\_imeko.v7i2.535](https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v7i2.535)
14. Jouffroy J. Underwater Vehicle Navigation Using Diffusion-Based Trajectory Observers [Electronic resource] / Jérôme Jouffroy, Jan Opderbecke // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2007. – Vol. 32, no. 2. – P. 313–326. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/joe.2006.880392>
15. Development of a Regional Underwater Positioning and Communication System for Control of Multiple Autonomous Underwater Vehicles / Sasano M., Inaba S., Okamoto A.—// Proc. of the IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV).— 2016.— № 6.— P. 431–434.
16. Experimental Validation of the Moving Long Base Line Navigation Concept / Vaganay J., Leonard J., Curcio J., Willcox S.— // Proc. of the Int. Conf. AUV.— 2004.— № 4.— P. 1–7.
17. An Algorithm for Cooperative Navigation of Multiple UUVs / Zhang L., Xu D., Liu M., Yan W., Gao J.—// Proc. of the sixth Int. Symposium on Underwater Technology, UT2009,— 2009.— № 78.— P. 1–6.
18. Comparing Kalman and particle filter approaches to coordinated multi-vehicle navigation / Mirabellot D., Sandersont A., Blidberg D.—// Proc. of the Int. Conf. UUST 2007.— 2007.— № 78.— P. 1–6.

Received (Надійшла) 11.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 08.11.2023

### Analysis of contemporary methods and prospects for the development of underwater vehicle navigation

A. Zaiets, Y. Kalinichenko

**Abstract.** This article conducts a comprehensive analysis of modern navigation methods for autonomous underwater vehicles, emphasizing their technological features, advantages, and limitations. Primary attention is given to five key methods: acoustic navigation, global positioning systems, Doppler velocity log (DVL) navigation, inertial navigation, trajectory observation navigation based on diffusion, as well as ensuring the navigation of groups of underwater vehicles. The study's results indicate that integrating various navigation methods can significantly enhance the reliability and accuracy of positioning underwater vehicles, ensuring effective mission execution in challenging conditions. Considering current technology development trends and operational requirements, the article also outlines directions for further research and developments in underwater navigation.

**Keywords:** autonomous underwater vehicles, acoustic navigation, Long Baseline, Ultra Short Baseline, Short Baseline, Kalman filter, Doppler Velocity Log, algorithm for integrated navigation NARX-RKF, dead reckoning navigation method and inertial navigation systems.

## МЕТОД СИНТЕЗУ БЕЗШОВНОЇ ТЕКСТУРОВАНОЇ СФЕРИ ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ У ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТА КАРТОГРАФІЧНИХ СИСТЕМАХ

**Анотація.** У статті розглянуто метод створення безшовної текстурованої моделі сфери та видалення артефактів пов'язаних з особливостями розрахунку текстурних координат при циліндричному проєціюванні. **Метою** статті є розробка методу побудови та візуалізації сферичних текстурованих об'єктів який би не мав недоліків існуючих методів, які пов'язані з виникненням наочно помітних візуальних артефактів при накладанні текстури на поверхню сфери. Наведено метод який дозволяє коректувати текстурні координати як на геометричному рівні, так і в процесі проведення візуалізації, в якому сфера умовно розділяється на частини відповідно до відстані від полюсів. Для кожної частини використовується найбільш оптимальний алгоритм текстуровання, що забезпечує швидкість методу. Обчислення за допомогою запропонованих алгоритмів можна повністю реалізувати за рахунок ресурсів GPU. За **результатами** дослідження визначено, що запропонований метод дозволяє видалити артефакти які виникають при розрахунку текстурних координат для циліндричного проєціювання як безпосередньо у процесі візуалізації, так і на етапі синтезу моделі сфери, що дозволяє значно покращити відображення текстур на поверхні сфери.

**Ключові слова:** теселяція, поділ рівної площини, GPU, MIP рівні, реалістичні візуальні сцени, текстуровання.

### Вступ

Картографічна проєкція - це систематичне перетворення широт і довгот місцевостей з поверхні сфери або еліпсоїда в місця на площині [1]. Будь які карти неможливо створити без застосування картографічних проєкцій. Проте поверхня сфери не може бути представлена на площині без спотворень, те саме стосується і інших опорних поверхонь таких як сплюснені сфероїди, еліпсоїди та геоїди. Для спрощення в цій статті припускається, що поверхня, яку потрібно відобразити, є сферою. Оскільки будь-яка картографічна проєкція є зображенням однієї з опорних поверхонь на площині, усі картографічні проєкції спотворюються, але кожна спотворюється певним чином. Залежно від призначення карти одні спотворення допустимі, а інші ні; тому існують різні картографічні проєкції, які зберігають одні властивості кулеподібного тіла за рахунок інших властивостей. У більш загальному плані поверхні планетних тіл можуть бути нанесені на карту, навіть якщо вони надто неправильні, щоб змоделювати їх за допомогою сфери чи еліпсоїда. Карти можуть бути кориснішими, ніж глобуси, у багатьох ситуаціях: вони компактніші та легші для зберігання, легко вміщують величезний діапазон масштабів та переглядаються на дисплеях комп'ютерів, можуть полегшити вимірювання властивостей регіону, що нанесено на карту. Також карти можуть показувати більші частини поверхні Землі одночасно. Але з розвитком комп'ютерної техніки, графічних прискорювачів та появою великої кількості різноманітних програм, зокрема геоінформаційних та картографічних систем, виникає і зворотна задача - як, маючи карту з відповідними спотвореннями, побудувати тривимірну модель відповідного тіла з якого ця карта була створена, наприклад модель земної кулі, або тіл сонячної системи, таким чином щоб мінімізувати кількість артефактів які виникають при модулюванні та візуалізації моделі.

**Метою статті** є розробка методу побудови та візуалізації сферичних текстурованих об'єктів який

би не мав недоліків існуючих методів, які пов'язані з виникненням наочно помітних візуальних артефактів при накладанні текстури на поверхню сфери. Процес візуалізації тривимірної моделі сфери може бути розділено на два етапи: побудова геометричної моделі та налагодження текстури на поверхню моделі. Проаналізуємо послідовно існуючі підходи та проблеми які виникають на кожному етапі.

### Побудова моделі сфери

Існує декілька методів побудови моделі сфери. Найбільш простіший з них, це теселяція (розбиття на трикутники) за широтою та довготою, але вона має відчутні артефакти на полюсах, та нерівномірну щільність трикутників. Інші методи, такі як геодезична теселяція, не містять цих недоліків. Серед них можна виділити дві групи методів: теселяція опуклого багатогранника (наприклад, ікосаедра) [2] та згладжування куба [3].

У першому методі, спочатку будується модель ікосаедру (тетраедру або октаедру) з трикутників, а далі кожен трикутник моделі додатково розділяється на менші трикутники, з відповідною нормалізацією координат нових вершин. Процес повторюється до досягнення заданої щільності сітки трикутників [4].

Інший метод, який базується на розділенні куба, працює схожим чином, але в якості базової сітки обирається більш проста фігура - куб, кожна грань якого теселюється окремо і незалежно від інших. Це дозволяє спростити та прискорити процес отримання нових вершин, використавши паралельні обчислювачі, кожен з яких буде опрацьовувати відповідну грань.

Процес отримання координат вершини **P** виглядає наступним чином:

$$\mathbf{P} = \mathbf{N} + s(i\mathbf{T} + j\mathbf{B}), \quad (1)$$

де **N** - нормаль до поверхні грані,  $s = 1/n$ , де  $n$  - кількість розділень,  $i$  та  $j$  - локальні координати на грані (від 0 до  $n - 1$ ), **T** - дотична до грані,  $\mathbf{B} = \mathbf{N} \otimes \mathbf{T}$  - бінормаль ( $\otimes$  - векторний добуток).

Після розрахунку вектору  $\mathbf{P}$ , отримане значення нормалізується і запам'ятовується як нормаль у вершині, а після масштабування висотою зберігається як актуальна позиція вершини. Наступною задачею є отримання сітки трикутників. Вона також може бути отримана незалежно для кожної грані. Сітка трикутників будується шляхом формування чотирикутників з вершин отриманих за (1) з їх подальшою тесесяцією, в залежності від того до якого квадранту грані вони належать: другий та четвертий квадранти тесесяються в прямому напрямку, а перший та третій

в зворотному. Індекси вершин чотирикутника  $a, b, c, d$  отримуються наступним чином

$$a = [f(n + 1) + j](n + 1) + i, b = a + 1,$$

$$c = [f(n + 1) + j + 1](n + 1) + i, d = c + 1, \quad (2)$$

де  $f$  - номер грані,  $i$  та  $j$  - координати чотирикутника на грані (від 0 до  $n - 1$ ).

Для прямого напрямку будуть сформовані трикутники:  $(a, b, c)$  та  $(a, c, d)$ ; для зворотного  $(a, b, d)$  та  $(b, c, d)$ . На рис. 1 показана відповідна сітка трикутників, яка отримана за наведеним методом.

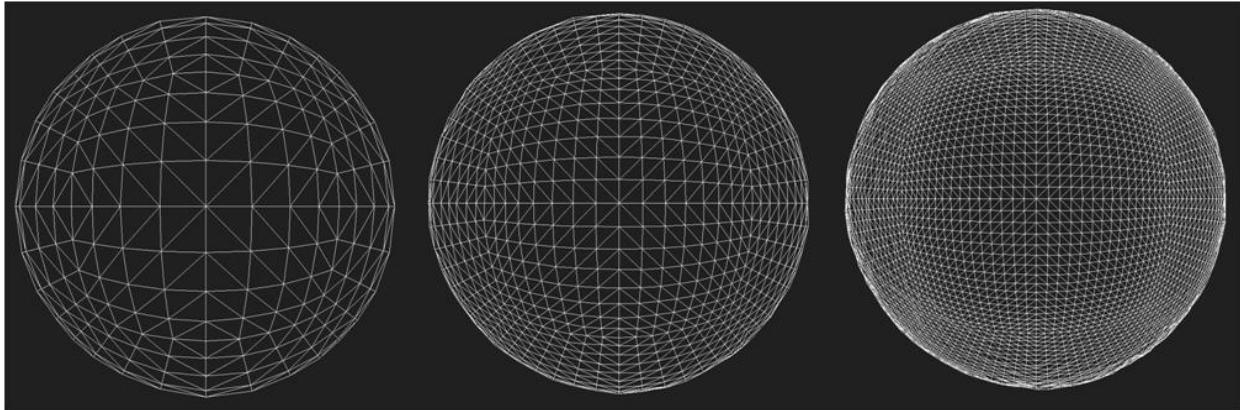


Рис. 1. Сітка трикутників як отримана після тесесяції та нормалізації куба, зліва направо, для 8, 16 та 32 розділень, відповідно

### Обчислення текстурних координат

Важливою частиною для будь якої системи візуалізації є накладання матеріалів на поверхню моделей об'єктів, що дозволяє придати їм необхідний (реалістичний вигляд). Цей процес на практиці виконується за допомогою накладання текстур, для чого потрібно обчислити текстурні координати для кожної вершини моделі.

Якщо сфера використовується як основа для якогось тіла сонячної системи, то доцільно застосувати якусь картографічну проекцію [1, 5], для того,

щоб можна було нанести існуючі картографічні зображення на модель сфери. Найбільш відомою є циліндрична проекція Ламберта, яка є основою сімейства циліндричних рівноплощинних проекцій. У цій проекції екватор обрано як паралель без спотворень, таким чином, помноживши висоту проекції на певний коефіцієнт і поділивши ширину на той самий коефіцієнт, області відсутності спотворень можна перемістити до будь-якої бажаної пари паралелей на північ і південь від екватора. На рис. 2 наведені спотворення які надає циліндрична рівноплощинна проекція Ламберта.

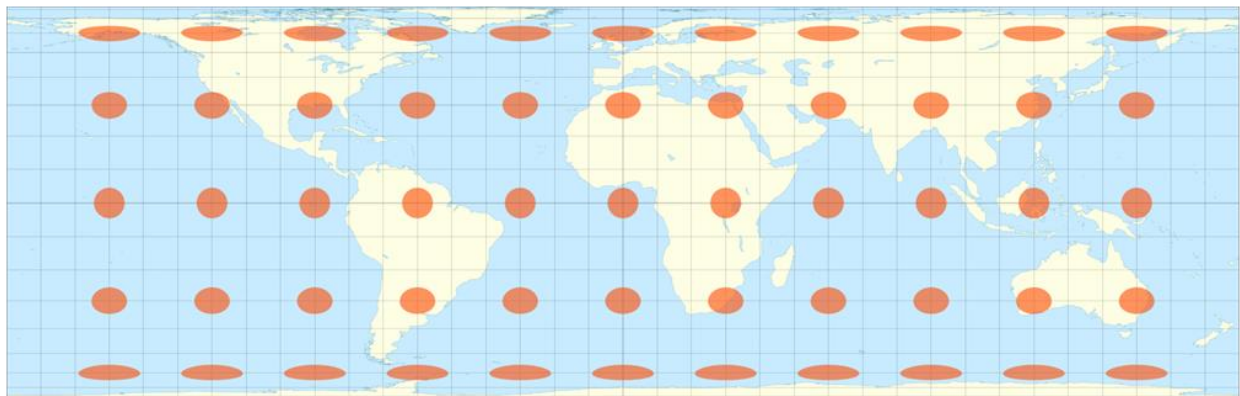


Рис. 2. Циліндрична рівноплощинна проекція Ламберта з індикатрисою деформації Тіссо (© Eric Gaba)

У картографії індикатриса Тіссо [6] є результатом проєціювання кола нескінченно малого радіуса з вигнутої геометричної моделі, такої як глобус, на карту. Одна індикатриса описує спотворення в якійсь одній точці, але оскільки викривлення різняться

на площині карти, зазвичай індикатриса Тіссо розміщуються по всій карті, щоб проілюструвати просторову зміну викривлення. Оскільки всі еліпси на карті мають одну й ту саму площу, спотворення яке внесене проекцією карти, є очевидним.

На рис. 3 показано процес формування відповідного зображення для циліндричної проекції.

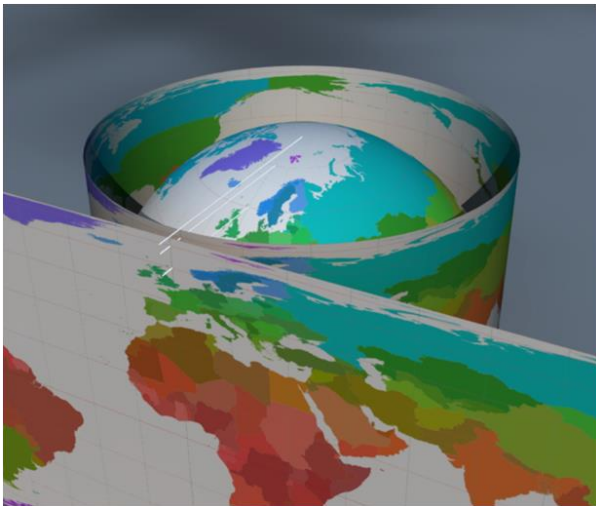


Рис. 3. Циліндрична проекція Землі (Public Domain)

Однією з найбільш поширених видів циліндричних проекцій є циліндрична рівнопрямокутна проекція. Така проекція відображає меридіани на вертикальні прямі лінії постійного інтервалу, а широти на горизонтальні прямі лінії постійного інтервалу. Така проекція не використовується в навігації чи кадастровому картографуванні, але, через простий зв'язок між положенням пікселя зображення на карті та його відповідним географічним розташуванням на Землі чи інших сферичних тілах Сонячної системи, знаходить своє використання в картографуванні. Вона є стандартом для глобальних наборів растрових даних: Celestia, NASA World Wind, USGS Astrogeology Research Program і Natural Earth. Крім того, така проекція часто використовується у панорамній фотографії та відеозйомці для представлення сферичного панорамного зображення [7], а також для формування зображень у віртуальних середовищах, які складаються з усюди направлених зображень, що відображалися у віртуальній реальності [8]. Для того щоб розрахувати відповідні текстурні координати для рівноплощинної проекції Ламберта для кожної вершини, необхідно використати наступні вирази:

$$\begin{aligned} \mathbf{N}_1 &= \|\mathbf{P} - \mathbf{P}_0\|, \\ u &= 0,5 + \frac{\text{atan2}(x_n, z_n)}{2\pi}, \\ v &= 0,5 - \frac{\arcsin(y_n)}{\pi}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $u$  та  $v$  - відповідні текстурні координати,  $\mathbf{N}_1 = (x_n, y_n, z_n)$  - напрям від центру сфери  $\mathbf{P}_0$  на точку  $\mathbf{P}$  на поверхні сфери, координати якої обчислені відповідно до (1), функція  $\text{atan2}(x_n, z_n)$  обчислює значення арктангенсу для  $x_n/z_n$  в діапазоні від  $-\pi$  до  $\pi$ ,  $\|\cdot\|$  - операція нормалізації векторів.

Для рівнопрямокутної проекції текстурна координата по вертикалі обчислюється як

$$v = 0,5 - 0,5y_n. \quad (4)$$

Отже, маючи список вершин сфери, можна обчислити текстурні координати для будь якої з них.

### Видалення прошарків які виникають при налагодженні текстур на модель сфери

При налагодженні текстур виникає дві завади, які породжують прошарки на моделі сфери. Перша завада виникає при перетині горизонтальною текстурною координатою межі між 1 та 0. Фактично вираз (3) для  $u$  дає дробову частину від координати, тому на стику двох граней остання вертикальна смуга прямокутників буде мати текстурні координати які пов'язують лівий та правий кути текстури і фактично вся текстура в зворотному напрямку буде накладатися на трикутники які входять до цієї смуги (рис. 4).



Рис. 4. Смуга чотирикутників з текстурними координатами в зворотному напрямку: a - на моделі Землі, b - на хмарному покриві

Для того щоб прибрати цю заваду, потрібно при теселяції чотирикутника аналізувати горизонтальну складову його текстурних координат, і якщо ця складова для будь якої вершини буде близької до 0, а для протилежної - близької до 1, потрібно додати до меншої 1, та продублювати відповідну вершину з новою текстурною координатою.

Це дозволяє повністю прибрати спотворення текстури показані на рис. 4.

Ще один тип візуальних артефактів виникає в полярних областях і обумовлений тим як будується проекція та інтерполяцією текстурних координат вздовж трикутника (рис. 5).

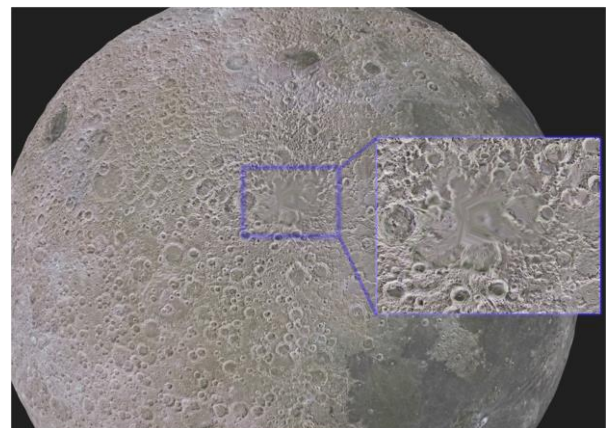


Рис. 5. Візуальні артефакти у полярних областях моделі Місяця, які обумовлені інтерполяцією текстурних координат

Відомі декілька методів як прибрати ці артефакти, найбільш простіший варіант - на полюсах моделі зробити спеціальну геометрію з іншим типом проєціювання, але такий варіант потребує окремої текстури та геометрії на моделі для полярних областей, та вирішення проблем з плавним переходом основної моделі у допоміжну, що непрактично.

Інший підхід для того щоб прибрати такі артефакти - обчислення текстурних координат у фрагментній мікропрограмі, безпосередньо в процесі візуалізації. Але це, в свою чергу, породжує інший тип артефактів, пов'язаний з тим як графічний процесор розраховує MIP рівень текстури для кожного фрагменту зображення - вертикальний прошарок завдовжки в один піксель (рис. 6). А полярні області, хоч і стають більш гладкими порівняно з попереднім (рис. 5), але все ще містять відчутні артефакти проєціювання (рис. 7). Таким чином потрібно розробити метод, який би покращив якість накладання текстур на модель сфери, який би не мав перелічених завад.

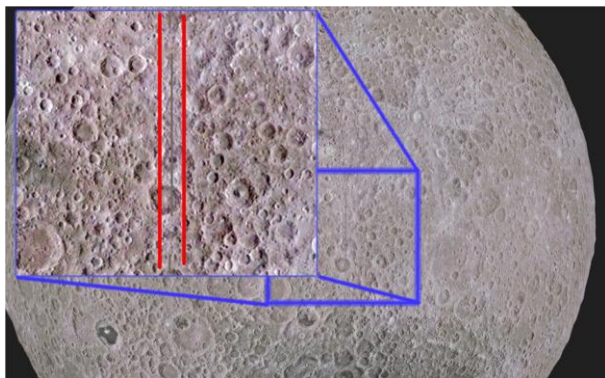


Рис. 6. Вертикальний прошарок пов'язаний з алгоритмом обрання MIP рівня текстури



Рис. 7. Артефакти проєціювання при розрахунку текстурних координат для кожного фрагменту

Проаналізуємо причини появи зазначених артефактів. Обидва типи артефактів виникають тому, що графічні процесори обчислюють MIP рівень текстури за так званими частковими похідними екранного про-

стору - величини зміни значення текстурної координати ( $u, v$ ) від довільного пікселя до пікселя поруч із ним, вище чи нижче. Графічні процесори зазвичай обчислюють це значення для кожного набору пікселів  $2 \times 2$ , тому MIP рівень визначається тим, наскільки ( $u, v$ ) змінюється з кожним із цих наборів. І коли обчислюється горизонтальна складова текстурних координат  $u$  для моделі сфери згідно з (3), на межі значення  $u$  значно змінюється між двома пікселями. Через це графічний процесор вважає, що вся текстура відображається між цими двома пікселями, і при розрахунку MIP рівня використовується найменший можливий рівень. Це в свою чергу веде до візуального артефакту. Координата  $v$  такого стрибка не робить ні при обчисленні згідно з (3), ні (4), тому в горизонтальній площині артефакту не виникає. Для того щоб прибрати цей артефакт дослідниками [9, 10] пропонується, або виділити ті пікселі для яких виникає артефакт і примусово змінити їх текстурні координати, або примусово розраховувати MIP рівень використовуючи отримані координати з (3), (4).

Всі перелічені методи мають декілька недоліків, серед яких:

- 1) Додаткові складні обчислення, що зменшують швидкість процесу візуалізації.
- 2) Залежність від обладнання та можливостей GPU.
- 3) Необхідність використання спеціальних інструкцій запиту до текстур із зазначенням часткових похідних.

В статті пропонується дещо інший підхід до вирішення цієї задачі. Так як артефакти, пов'язані з інтерполяцією текстурних координат, виникають фактично лише в полярних областях. При цьому, у стандартному запиті даних з текстури (коли MIP рівні розраховуються автоматично за текстурними координатами що інтерполюються) артефактів наведених на рис.6 не виникає. Доцільно розраховувати текстурні координати у фрагментній мікропрограмі, безпосередньо в процесі візуалізації лише для полярних областей (наприклад, більших за 95%, та менших за 5% за вертикальною складовою текстурних координат). Це також теоретично, збільшить швидкість системи візуалізації для всієї решти поверхні сфери. Тобто для всіх інших (не полярних областей) запит даних з текстури буде відбуватися за попередньо розрахованими текстурними координатами які зберігаються в геометричному описі моделі, з автоматичним розрахунком MIP рівнів. А для полярних областей потрібно скорегувати MIP рівень у бік збільшення в залежності від відстані до найближчого полюса. Для цього потрібно обчислити відносні відстані до полюсів ( $v_S, v_N$ ) від довільно обраного кола - полярних областей, для яких ведеться розрахунок текстурних координат на рівні фрагментів (рис. 8):

$$v_N = \frac{[v-(1-b)]}{b},$$

$$v_S = 1 - \frac{v}{b}, \quad (5)$$

де  $b$  - відстань від полюсу до кола умовного початку детального розрахунку,  $v$  - вертикальна складова текстурних координат.

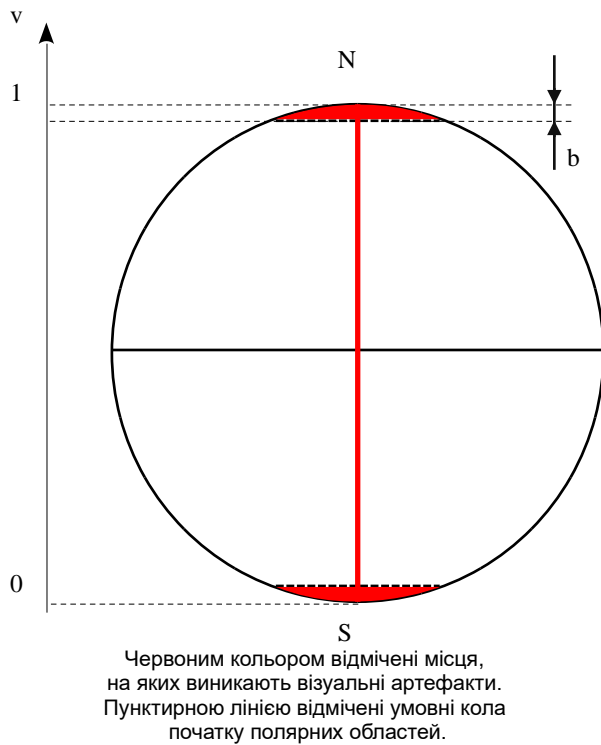


Рис. 8. Межі областей на моделі сфери (вид збоку)

Далі необхідно скорегувати поточний МІР рівень  $l$  за допомогою обраної відстані  $\hat{v} = (v_N | v_S)$ , яка обирається як відстань до найближчого полюсу:

$$\hat{l} = \frac{\max(0, l - 1)}{a\hat{v}}, \quad (6)$$

де  $\hat{l}$  - скоригований МІР рівень,  $a$  - масштабуючий коефіцієнт (від 2 до 8 в залежності від загальної кількості МІР рівнів у текстурі яка накладається).

Після розрахунку  $\hat{l}$  за виразом (6), він безпосередньо використовується у запитах даних з текстур.

### Практичне дослідження запропонованого методу

Випробування проводилися на ПК (CPU - Intel Core i5 11400H 2.7GHz, GPU - nVidia 3050 3Gb, RAM - 64Gb) під керуванням ОС Windows 11, із застосуванням графічної бібліотеки DirectX11.

Модель сфери була побудована з 64 розбиттів і містить 14596 вершин які поєднані у 27648 трикутників. Мікропрограми для GPU були написані на мові HLSL (Pixel Shader 5.0). Для рендерингу використовувалася текстура розміром 8192x4096, 32 біт на піксель.

На рис. 9 наведені результати рендерингу полярної області сфери згідно запропонованому алгоритму розрахунку МІР рівня.

Як можна побачити, всі зазначені вище артефакти повністю зникли.

Результати роботи системи візуалізації із застосуванням запропонованого методу для різних тіл сонячної системи наведені на рис.10.

Після компіляції мікропрограми, з'ясовано, що реалізація алгоритму потребує 59 додаткових інструкцій, які виконуються лише для 10% поверхні

сфери, за допомогою оператора динамічного розгалуження. Для профілювання мікропрограми застосовувався спеціалізований додаток PIX on Windows. З мікропрограми були вилучені всі операції пов'язані з розрахунком освітлення.

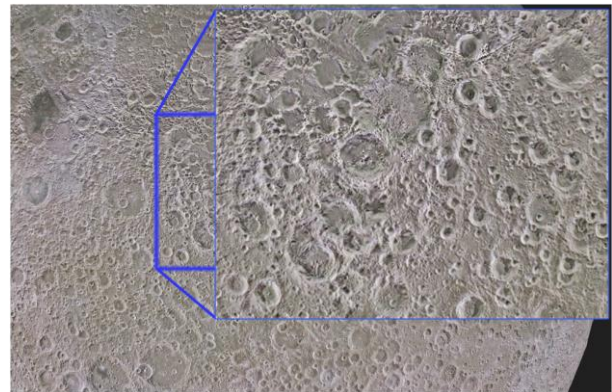


Рис. 9. Рендеринг полярних областей моделі за допомогою запропонованого алгоритму

Для оцінки швидкодії вимірявся час рендерингу моделі сфери, яка на екрані була вписана у квадрат розміром 1024x1024 пікселя, таким чином мікропрограмою оброблялося приблизно 824 тисячі фрагментів.

Проводилося три фази тестування:

- 1) стандартний рендеринг з інтерпольованими текстурними координатами (мікропрограма довжиною 6 інструкцій);
- 2) рендеринг за допомогою запропонованого методу (мікропрограма довжиною 59 інструкцій) вид збоку з мінімальною кількістю фрагментів для яких ведеться розрахунок текстурних координат;
- 3) рендеринг за допомогою запропонованого методу (мікропрограма довжиною 59 інструкцій) вид згори на полюс з максимальною кількістю фрагментів для яких ведеться розрахунок текстурних координат.

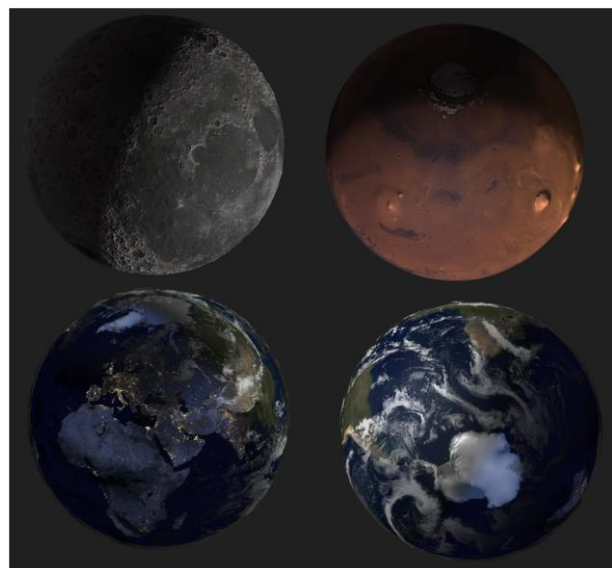


Рис. 10. Результати роботи запропонованого методу у складі системи візуалізації



Кожен тест проводився 10 разів, результат усереднювався.

Результати тестування наведені у табл. 1 (А – № тесту; В – час рендерингу сфери, мкс; С – загальний час рендерингу кадру, мкс).

Таблиця 1 – Час рендерингу сфери

А	Тип мікропрограми	В	С
1	Стандартний запит з текстур (6 інструкцій)	188	443
2	Запропонований метод (59 інструкцій) – вид збоку	188	443
3	Запропонований метод (59 інструкцій) – вид згори на полюс	205	465

### Висновки

Наведений алгоритм дозволяє видалити артефакти які виникають при розрахунку текстурних координат як безпосередньо у процесі візуалізації, так і на етапі побудови моделі сфери, що дозволяє

значно покращити відображення полярних областей сфери.

1) Для реалізації алгоритму розрахунку MIP рівня потрібно 59 інструкцій (при компіляції мікропрограми з мови HLSL).

2) Час рендерингу сфери при застосуванні запропонованого методу, при максимальній кількості фрагментів для яких розраховуються текстурні координати, збільшується не більше ніж на 10% (загальний час рендерингу кадру збільшується не більше ніж на 5%).

3) Фактично алгоритм розрахунку MIP рівня виконується лише для 10% фрагментів сфери, а для решти, за допомогою оператора динамічного розгалуження, обирається стандартна мікропрограма запити з текстури з автоматичним розрахунком MIP рівня за текстурними координатами що інтерполюються.

4) Запропонований метод дозволяє видалити артефакти пов'язані з проєціюванням текстури без модифікації геометричної моделі сфери та додавання якихось додаткових елементів до неї.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Snyder, J. P. (1997). *Flattening the Earth. Two Thousand Years of Map Projections*. Chicago and London: University of Chicago Press. 384 p. ISBN: 9780226767475
- Orsolya Gáspár. The optimization process leading to the tessellation of the first geodesic dome structure, the first Planetarium of Jena. *International Journal of Space Structures* 2022, Vol. 37(1) 49–64. DOI: 10.1177/09560599211064110
- Catmull, E.; Clark, J. (1978). Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes. *Computer-Aided Design*. 10 (6): 350. DOI:10.1016/0010-4485(78)90110-0.
- Edward S. Popko, Christopher J. Kitrick. *Divided Spheres: Geodesics and the Orderly Subdivision of the Sphere*. CRC Press, 2021. 484 pages. ISBN 1000412431, 9781000412437
- Henrik Hargitai, Jue Wang, Philip J. Stooke et al. Choosing a Map Projection. Chapter 7. *Map Projections in Planetary Cartography*. April 2017. pp.177-202. DOI: 10.1007/978-3-319-51835-0\_7
- Goldberg, David M.; Gott III, J. Richard (2007). Flexion and Skewness in Map Projections of the Earth. *Cartographica*. 42 (4): 297–318. arXiv:astro-ph/0608501. DOI:10.3138/carto.42.4.297.
- Adrian Dziembowski, Dawid Mieloch, Olgierd Stankiewicz et al. Virtual View Synthesis for 3DoF+ Video. 2019 Picture Coding Symposium (PCS). November 2019. DOI: 10.1109/PCS48520.2019.8954502
- Olga Lukashova-Sanz, Siegfried Wahl. Saliency-Aware Subtle Augmentation Improves Human Visual Search Performance in VR. February 2021. *Brain Sciences* 11(3):283. DOI: 10.3390/brainsci11030283
- Marco Tarini. Cylindrical and Toroidal Parameterizations Without Vertex Seams. *Journal of Graphics Tools*. 2012 Vol.16(3). pp. 144-150. DOI:10.1080/2151237X.2012.654054
- Ben Golus. Distinctive Derivative Differences. Pesky Problems with Procedural UVs. [Електронний ресурс] URL: <https://bgolus.medium.com/distinctive-derivative-differences-cce38d36797b>.

Received (Надійшла) 25.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.11.2023

### Seamless textured sphere synthesis method for visualization in geo-information and mapping systems

A. Zuev

**Abstract.** The method of creating a seamless textured sphere model and removing artifacts associated with the issues of calculating texture coordinates during cylindrical projection is considered. The **purpose** of the article is to develop a method for synthesis and visualizing spherical textured objects that would not have the disadvantages of existing methods, which are associated with the appearance of visually noticeable visual artifacts related with the textures applied to the sphere surface. A method is given that allows you to correct texture coordinates both at the geometric level and in the process of visualization, in which the sphere is conventionally divided into parts according to the distance from the poles. For each part, the most optimal texturing algorithm is used, which ensures the performance of the method. Calculations using the proposed algorithms can be fully implemented at the cost of GPU resources. Based on the **results** of the study, was determined that the proposed method allows removing artifacts that occur when calculating texture coordinates for cylindrical projection both directly in the visualization process and at the stage of synthesis of the sphere model, which allows to significantly improve the quality of the appearance of the sphere surface.

**Keywords:** tessellation, equal-area subdivision, GPU, MIP levels, realistic visual scenes, texturing.

Є. В. Калініченко, Є. Є. Постніков

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

## МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ СТРУКТУРНОЇ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ «БУКСИРУВАЛЬНИК – СЕЙСМІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ» ПРИ МАНЕВРУВАННІ

**Анотація. Актуальність.** Буксирування будь-якого об'єкта в морі є окремим випадком судноводіння та потребує максимального рівня безпеки. Для вирішення цього актуального завдання необхідно вдосконалення відомих та розробки нових методів проведення морських буксирвальних операцій, які пов'язані з масовою доставкою до місця розвідувальних робіт постачання та обладнання на спеціалізованих плавучих спорудах, що мають ознаки «маломорехідних» об'єктів. **Мета статті:** удосконалити метод оцінювання структурної стійкості системи «буксирвальник – сейсмічне обладнання» при маневруванні. **Результати дослідження.** В статті розроблено метод оцінювання структурної стійкості системи «буксирвальник – сейсмічне обладнання» при маневруванні, що забезпечує безпечне буксирування сейсмічного обладнання в будь-який момент часу. Особливість методу полягає в тому, що ймовірність стійкості структури в межах розширених припущень визначена за допомогою теореми Боголюбова та індикаторної функції, що дозволяє визначити потенційні небезпеки, ризики та розміри ймовірної шкоди людині, буксирувальнику, сейсмічному обладнанню або навколишньому середовищу від змін структури організаційно-технічної системи буксирування сейсмічного обладнання, а також визначити події, при яких порушується структурна стійкість та експлуатаційний стан складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання, які не відповідають умові навігаційної безпеки.

**Ключові слова:** буксирвальна операція, морський транспорт, навігація, ризик, сейсмічне обладнання.

### Вступ

В умовах розв'язаної повномасштабної війни Російської Федерації проти України виникає актуальне державне завдання забезпечення мореплавства у Чорному морі.

Крім того, втрата Криму й відповідного шельфу призводить до необхідності сейсмічної розвідки та пошуку корисних копалин для забезпечення енергетичної безпеки України.

Після перемоги над країною-агресором виникне актуальне завдання оцінювання вичерпності ресурсів шельфу Чорного моря та пошуку нових родовищ.

Сейсмічна розвідка моря проводиться відповідним обладнанням, яке, як, правило буксирується. Особливостями сейсмічної розвідки у районі Чорного моря є порівняно невелика глибина (у середньому близько 1240 м), що потребує оцінки ризиків маневрування при буксуванні сейсмічного обладнання [1].

**Постановка проблеми.** Буксирування будь-якого об'єкта в морі є окремим випадком судноводіння та потребує максимального рівня безпеки [2].

Для вирішення цього актуального завдання необхідно вдосконалення відомих та розробки нових методів проведення морських буксирвальних операцій, які пов'язані з масовою доставкою до місця розвідувальних робіт постачання та обладнання на спеціалізованих плавучих спорудах, що мають ознаки «маломорехідних» об'єктів.

**Аналіз існуючих літературних джерел.** Завдання оцінювання структурної стійкості системи «буксирвальник – сейсмічне обладнання» при виконанні буксирвальних операцій знайшло рішення у роботах як вітчизняних, так і закордонних дослідників й має декілька напрямків наукового дослідження.

Дослідниками, на роботи яких спирається автор, є такі:

- Вагущенко Л. Л. [6],
- Мальцев А. С. [7],
- Нечаєв Ю. І. [8],
- Піпченко О. Д. [9, 10],
- Asuelimen G., Blanco-Davis E., Wang J [11],
- Fossen T. I. [12].

**Мета статті:** удосконалити метод оцінювання структурної стійкості системи «буксирвальник – сейсмічне обладнання» при маневруванні.

### Виклад основного матеріалу

Під час проведення сейсмічної розвідки має проводитись постійний контроль сейсмічного обладнання та його поведінки в морі.

Контроль, зазвичай, здійснюється технічними засобами об'єктивного контролю та візуально, особливо під час хитаєві.

Перевірка стану буксирувальної лінії та положення сейсмічного обладнання проводиться систематично на розсуд судноводія. Також при підготовці до виходу в море проводиться:

- технічне обслуговування буксирувального троса,
- змащувальні процедури в місцях кріплення, роллів і клюзів,
- здійснюється перевірка справності сейсмічного обладнання.

Перед початком буксирування сейсмічного обладнання дані його технічного стану відображаються у журналі буксирування.

Під час сейсмічної розвідки у темний час доби або в умовах обмеженої видимості склад суден повинен вживати дії для попередження надмірного зближення з іншими суднами.

При погіршенні погодних умов під час сейсмічної розвідки судноводій буксирувальника має

виконати низку дій для забезпечення безпеки складу суден:

- зниження швидкості буксирування;
- зменшення/збільшення довжини буксирувального тросу;
- вибір безпечного для складу суден курсових кутів за вітром та рівнем хитавиці;
- посилення спостереження за станом сейсмічного обладнання;
- згортання сейсмічного обладнання.

По закінченню сейсмічної розвідки керівник оформлює відповідні документи, в яких фіксується час початку та завершення буксирування, маршрут, події, що виникли під час розвідки.

Дані сейсмічної розвідки оброблюються та узагальнюються.

Варіантом вирішення проблемних (аварійних) ситуацій у відносно стабільних структурах управління, до яких належить операція буксирування сейсмічного обладнання, є метод усереднення. Він використовується при дослідженні процесу функціонування структури організаційно-технічної системи, відповідальної за буксирування сейсмічного обладнання.

Проте, складності використання методу виникають при практичній реалізації у випадку, коли наближення справедливо не для часового відрізка  $[0; \frac{1}{\varepsilon}]$ , де  $\varepsilon > 0$  – малий параметр, а для значно меншого часового інтервалу. При цьому не виконуються умови, які дозволяють виконати тільки перше наближення.

Одержимо наближення для часового проміжку  $[0; \frac{1}{\varepsilon}]$  методом стандартного усереднення.

Стан системи управління безпекою судна, як система диференціальних рівнянь першого порядку, записаний у стандартному вигляді:

$$dx/dt = \varepsilon X(x, t, \varepsilon), \quad \text{де } x \in R^r, \varepsilon \in (0, \varepsilon], \quad t \in [0, \infty). \quad (1)$$

Нехай функція  $X(x, t, \varepsilon)$  рівномірно обмежена при  $x = 0$ . Тоді виконується умова Липшица за аргументом  $x$ :

$$|X(x_1, t, \varepsilon) - X(x_2, t, \varepsilon)| \leq M_{|x_1 - x_2|},$$

де  $M = const, x_1, x_2 \in R^r$ .

У такому випадку кожна із задач Коші

$$x(0) = x_0$$

для рівняння (1) буде мати тільки одне нелокально-продовжене рішення у формі  $x(t, x_0, \varepsilon)$ .

Рішенням правої частини усередненого рівняння (1) буде формула:

$$Z(x, \varepsilon) = (1/T) \varepsilon \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T X(x, t, 0) dt, \quad (2)$$

при функції  $X(x, t, \varepsilon)$ , що допускає усереднення як обов'язкову умову, і коли, функція  $\sigma(\varepsilon)$  така, що  $\sigma(\varepsilon) \rightarrow 0$  при  $(\varepsilon) \rightarrow 0$  для будь-якої обмеженої області  $\Omega \subset R^r$ , буде виконуватися умова:

$$\limsup_{\varepsilon \rightarrow \infty} \left| \varphi(x) - (\varepsilon/\sigma(\varepsilon)) \int_0^{\frac{\sigma(\varepsilon)}{\varepsilon}} X(x, t + s, \varepsilon) ds \right| = 0, \quad (3)$$

$$x \in \Omega \quad 0 \leq t \leq \varepsilon 1/\varepsilon.$$

У випадку виконання сформульованої умови межа виразу (2) може виявитися неіснуючою або бути відмінною від функції  $\varphi(x)$ .

При використанні звичайного методу усереднення достатньо виконання умови для кожної з обмежених областей

$$\limsup_{\varepsilon \rightarrow \infty} |X(x, t, \varepsilon) - X(x, t, 0)| = 0, \quad x \in \Omega \quad 0 \leq t \leq \varepsilon 1/\varepsilon. \quad (4)$$

Допущення (4) свідчить про необхідність застосування звичайного методу усереднення.

Якщо для будь-якої обмеженої області  $\Omega \subset R^r$  виконується умова (4), тоді межа (3) існує тільки у випадку, якщо функція  $X(x, t, \varepsilon)$  допускає усереднення. Тоді

$$\lim_{T \rightarrow \infty} (1/T) \int_0^T X(x, t, 0) dt = \varphi(x) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon \int_0^{1/\varepsilon} X(x, t, \varepsilon) dt$$

і умова (3) виконується для будь-якої обмеженої області

$$\Omega \subset R^r$$

і будь-якої функції

$$\sigma(\varepsilon) = \varepsilon^\alpha,$$

де  $\alpha < 1$ .

Розширити можливості методу усереднення можливо, якщо припустити, що функція

$$X(x, t, \varepsilon)$$

допускає усереднення й існує межа:

$$\varphi(x) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon \int_0^{1/\varepsilon} X(x, t, \varepsilon) dt,$$

а функція  $\varphi(x)$  з постійної  $M$  буде задовольняти умові Липшица.

Тоді задача Коші:

$$dx'/dt = \varepsilon \varphi(x'), \quad x'(0) = x_0 \quad (5)$$

має тільки одне рішення:

$$x'(t, x_0, \varepsilon).$$

Для будь-якої обмеженої області

$$\Omega \subset R^r$$

та для будь-якого  $\sigma > 0$  можна знайти таке число  $\varepsilon_1 > 0$ , при якому зі співвідношень

$$0 < \varepsilon \leq \varepsilon_1 \text{ і } x_0 \in Q,$$

враховуючи умову (3), одержимо нерівність

$$\max |x'(t, x_0, \varepsilon) - x(t, x_0, \varepsilon)| < \sigma;$$

$$0 \leq t \leq 1/\varepsilon.$$

Нерівність підтверджує факт, що за умови (3) функція  $X(x, t, \varepsilon)$  приймає усереднене значення за проміжок часу приблизно  $\sigma(\varepsilon)/\varepsilon$ .

У цей же період часу  $x(t, x_0, \varepsilon)$  зміниться на значення порядку  $\sigma(\varepsilon)$ .

Отже, траєкторія  $x(t, x_0, \varepsilon)$  у системі (1) виявиться подібною до траєкторії  $x'(t, x_0, \varepsilon)$  усередненої системи (5).

На цій підставі слід вважати, що представлений спосіб методу усереднення буде застосований для більш широких допущень, і дозволить визначити відповідне приближення, поряд зі звичайним методом усереднення.

Процес управління ризиком у структурах, що забезпечують безпеку буксирування сейсмічного обладнання, має всебічно розглядати різні аспекти операції буксирування, пов'язані з ризиком, що передбачає:

- визначення й аналіз ризику,
- оцінку помірному ризику із розрахунком можливості його зниження, застосовуючи контроль керуючих дій.

Визначення потенційних небезпек, їх аналіз та визначення відповідних ризиків є структурованим процесом, завдання якого полягає у визначенні ступеню ймовірності виникнення події та розміру ймовірних збитків та втрат від змін структури організаційно-технічної системи буксирування сейсмічного обладнання.

Наслідками несприятливих подій слід вважати міру завдання шкоди людині, буксирувальнику, сейсмічному обладнанню або навколишньому середовищу. При здійсненні аналізу можливого ризику необхідно провести аналіз його похідних та наслідків:

- ідентифікація небезпеки, що полягає у визначенні причини реструктуризації системи;
- ймовірність виникнення небезпечної ситуації та частота її виникнення;
- втрати та збитки тієї чи іншої небезпечної ситуації, оцінка наслідків.

Для визначення ймовірності події застосовується індикаторна функція:

$$f(x) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) < \sigma, \\ 0, \text{ якщо } x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) \geq \sigma. \end{cases} \quad (6)$$

Тоді вираз

$$\left[ \int_0^t f(x) dt \right] / m$$

визначає частку в результаті розподілу кількості станів

$$x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) < \sigma \text{ (одиниць)}$$

на загальну кількість  $m$  станів спостережень організаційно-технічної структури безпеки (одиниць і нулів).

У такому випадку рівність дає можливість визначити ймовірність (середню частоту) структурної стійкості організаційно-технічної структури, відповідальної за безпечне буксирування сейсмічного обладнання:

$$f^*(x) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[ \int_0^t f(x) dt \right] / m.$$

Нехай для будь-якої множини  $X$  функція  $f^*(x)$  дорівнює постійній величині. Тоді, з урахуванням співвідношення:

$$\int_X f^*(x) dm = \int_X f(x) dm$$

одержимо таку рівність:

$$1/m \sum_{k=1}^m f(x) = m(x)/m(X) = \text{const} = p.$$

### Основні результати

Отже, ймовірність стійкості організаційно-технічної структури, що забезпечує безпечне буксирування сейсмічного обладнання в будь-який момент часу визначена за допомогою значення  $p$  в межах теореми Боголюбова.

У такому випадку часовій послідовності змін (1) структури організаційно-технічної системи буксирування сейсмічного обладнання притаманна властивість ергодичності.

Аналогічно до гіпотези повної ймовірності складної події виду (6), отримаємо значення ймовірності  $p_0$  подій

$$x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) \geq \sigma,$$

при яких порушується структурна стійкість та експлуатаційний стан складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання, які не відповідають умові безпечної експлуатації, а, отже, і навігаційної безпеки.

Запропонований метод усереднення дозволяє знаходити необхідне відповідне наближення для оцінки ймовірності стійкості структури організаційно-технічної системи управління навігаційним станом складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання в межах розширених припущень.

Для підтримання стану структурної стійкості достатнім є привести до мінімуму величину  $p_0$ , оскільки область реалізації послідовності структурних переходів містить дві точки щільності.

Ресурс буксирувальника та сейсмічного обладнання дозволяє забезпечити підтримку стійкості структури в системі управління станом навігації складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання.

## Висновки

Таким чином, удосконалено метод оцінювання структурної стійкості системи “буксирвальник – сейсмічне обладнання” при маневруванні, що забезпечує безпечне буксирування сейсмічного обладнання в будь-який момент часу, в якому на відміну від відомих, ймовірність стійкості структури в межах розширених припущень визначена за допомогою теореми Боголюбова та індикаторної функції,

що дозволяє визначити потенційні небезпеки, ризики та розміри ймовірної шкоди людині, буксирвальнику, сейсмічному обладнанню або навколишньому середовищу від змін структури організаційно-технічної системи буксирування сейсмічного обладнання, а також визначити події, при яких порушується структурна стійкість та експлуатаційний стан складу суден буксирвальника та сейсмічного обладнання, які не відповідають умові навігаційної безпеки.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Технологія видобування нафти / В. М. Орловський, В. С. Білецький, В. Г. Вітрик, В. І. Сіренко. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, НТУ «ХПІ», ТОВ НТП, «Бурова техніка», Львів, «Новий Світ – 2000», 2022. 308 с., available at: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/fa0fd3ad-889a-46da-8e88-92f0ba6cd049/content>
2. Polydorides N., Storteig E., Lionheart W. Forward and inverse problems in towed cable hydrodynamics. *Ocean Engineering*. 2008. Vol. 35, No 14–15. P. 1429–1438, DOI: [10.1016/j.oceaneng.2008.07.001](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.07.001), available at: [https://www.researchgate.net/publication/222516613\\_Forward\\_and\\_inverse\\_problems\\_in\\_towed\\_cable\\_hydrodynamics](https://www.researchgate.net/publication/222516613_Forward_and_inverse_problems_in_towed_cable_hydrodynamics)
3. Ткаченко І. О. Ризики у транспортних процесах : навч. посібник / І. О. Ткаченко. –Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 114 с.
4. Голиков В. А., Мальцев А. С. Концепция создания системы гарантированной безопасности управления морскими подвижными объектами. Судовождение : сб. научн. трудов ОНМА. 2007. Вып. 13. С. 58– 74, available at: [http://old.onma.edu.ua/index.php?nauka-sv\\_ua](http://old.onma.edu.ua/index.php?nauka-sv_ua)
5. Priyadarshini D., Muhammad J., Mauerman L. Utilizing Skills to Improve Behavior Based Safety. *PSJ*, 2020. P. 48–52, available at: [https://www.researchgate.net/publication/344619575\\_Utilizing\\_Skills\\_to\\_Improve\\_Behavior\\_Based\\_Safety](https://www.researchgate.net/publication/344619575_Utilizing_Skills_to_Improve_Behavior_Based_Safety)
6. Вагущенко Л. Л., Вагущенко А. Л. Поддержка решений по расхождению с судами. Одесса : Феникс, 2010. 229 с., available at: [http://www.eurostarltd.net/prog/vagushchenko\\_rashozhdenie\\_sudami.htm](http://www.eurostarltd.net/prog/vagushchenko_rashozhdenie_sudami.htm)
7. Мальцев А. С. Интеллектуальные гибридные системы поддержки принятия решений при расхождении судов. Судовождение : сб. научн. трудов ОНМА, 2006. Вып. 11. С. 74–86.
8. Нечаев Ю. И., Сизов В. Г. Принятие решений в условиях неопределенности в задачах безопасности мореплавания. Судовождение : сб. научн. трудов ОНМА, 2006. Вып. 11. С. 91–107.
9. Піпченко О. Д. Розвиток теорії та практики управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.13. Одеса, 2021.
10. Піпченко А. Д. Определение дистанции опасного сближения при расхождении маневром собственного судна. Вестник Одесского национального морского университета, 2017. Вып. 2(51). С. 156–164, available at: <http://visnyk.onmu.odessa.ua/index.php/1/issue/view/53>
11. An M., Wang J., Ruxton T. The development of fuzzy linguistic risk level for analysis of offshore engineering products using approximate reasoning approach. *Proceedings of OMAE 2000, the 19th International Conference of offshore mechanics and Arctic Engineering*. New Orleans, USA, 2000. P. 321–329.
12. Fossen T. I. A Nonlinear Unified State-Space Model for Ship Maneuvering and Control in a Seaway. *Norwegian University of Science and Technology*, 2005. 28 p.

Received (Надійшла) 11.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.11.2023

## Method of evaluating the structural stability of the system "tug - seismic equipment" during manoeuvring

Y. Kalinichenko, Y. Postnikov

**Abstract. Topicality.** Towing any object at sea is a special case of shipping and requires the highest level of safety. To solve this urgent task, it is necessary to improve the known and develop new methods of conducting sea towing operations, which are associated with the mass delivery of supplies and equipment to the place of reconnaissance work on specialized floating structures that have the characteristics of "low-speed" objects. **The purpose of the article:** to improve the method of assessing the structural stability of the "tug-seismic equipment" system during maneuvering. **Research results.** The article develops a method for assessing the structural stability of the "towboat - seismic equipment" system during maneuvering, which ensures safe towing of seismic equipment at any time. The peculiarity of the method is that the probability of stability of the structure within the extended assumptions is determined using Bogolyubov's theorem and the indicator function, which allows to determine potential dangers, risks and the extent of probable damage to a person, a tugboat, seismic equipment or the environment from changes in the structure of the organizational and technical system towing of seismic equipment, as well as to determine events that violate the structural stability and operational condition of the towing vessel and seismic equipment, which do not meet the condition of navigational safety.

**Keywords:** towing operation, marine transport, navigation, risk, seismic equipment.

І. М. Ключніков

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

## МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРИ ТА СКЛАДУ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ ПОБУДОВАНОЇ НА ОСНОВІ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

**Анотація.** Аварія на атомній електростанції (АЕС) в м. Фукусіма показала, що використання систем моніторингу на основі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) дозволило здійснювати оцінку наслідків аварії та проводити післяаварійний моніторинг інфраструктури АЕС та навколишньої території. Однак, розгортання такої системи моніторингу здійснювалось вже після аварії, коли не було інших можливостей для отримання інформації. Крім того процес створення та розгортання таких систем, які є унікальними, та призначені для моніторингу конкретного об'єкту. Поширення застосування БПЛА на різноманітні сфери покаже, що вони можуть використовуватись як гнучкі сервіси для виконання різних завдань в автономному режимі, що передбачає впровадження засобів їх інтелектуалізації. Одним з напрямів розвитку атомної енергетики є малі модульні реактори (ММР) і використання БПЛА у складі систем моніторингу інфраструктури ММР дозволить вирішувати широке коло завдань. **Предметом статті** є процес формування систем моніторингу на основі БПЛА. **Мета статті** – запропонувати підхід з вдосконалення процесу синтезу інтелектуальних систем моніторингу об'єктів атомної енергетики. **Завдання статті:** запропонувати метод визначення структури та складу мультиагентних систем моніторингу на основі БПЛА (МА-БПЛА-СМ) для виконання різноманітних завдань з урахуванням вимог та умов навколишнього середовища, для чого розробити концептуальну модель холонічної МА-БПЛА-СМ та базу знань у вигляді онтології, для виведення необхідних знань під час синтезу МА-СМ; надати приклад використання запропонованого методу для формування структури МА-БПЛА-СМ при виконанні завдань моніторингу ММР (МА-БПЛА-ММР-СМ), а саме здійснення моніторингу у складі системи фізичного захисту ММР. Отримані наступні **результати роботи.** Розроблена і описана концептуальна модель холонічної МА-БПЛА-ММР-СМ. Розроблено та описано метод визначення структури та складу МА-БПЛА-ММР-СМ. При цьому враховано необхідність формування підсистеми виконання завдань у вигляді холонів БПЛА та холонів забезпечення тривалого функціонування МА-БПЛА-ММР-СМ. Розроблено варіант онтологічної бази знань та показано приклад її використання для отримання переліку БПЛА, обладнання, необхідного для виконання завдань у визначених умовах з заданими вимогами. Розглянуто можливі варіанти здійснення моніторингу фізичної безпеки інфраструктури ММР та запропонована модель функціонування МА-БПЛА-ММР-СМ з періодичним покриттям зони обмеженого доступу, яка дозволяє визначати необхідну чисельність БПЛА та станцій обслуговування. **Напрямок подальших досліджень** полягає у розробці методу вибору та імплементації моделей, необхідних для визначення потрібної чисельності БПЛА в МА-БПЛА-ММР-СМ для забезпечення заданих показників надійності виконання завдань.

**Ключові слова:** система моніторингу; холонічна мультиагентна система; онтологія; безпілотний літальний апарат; станція обслуговування; малий модульний реактор; фізичний захист.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Застосування БПЛА в системах моніторингу дозволяє значно розширити можливості таких систем та здійснювати виконання завдань в умовах, небезпечних для людини. Наразі, системи моніторингу об'єктів критичної інфраструктури, зазвичай розгортаються в умовах часових обмежень та в унікальних специфічних умовах [1, 2].

Аварія на атомній електростанції у Фукусімі показала, що використання безпілотних літального апаратів (БПЛА) дозволило розгорнути систему моніторингу для визначення наслідків аварії [3, 4].

ММР зараз є одним з найбільш перспективних трендів в галузі електроенергетики. Особливості побудови ММР та широке коло завдань моніторингу, які необхідно виконувати в процесі їх експлуатації, для виконання яких доцільно застосовувати БПЛА, обумовлюють використання БПЛА як сервісів, що можуть виконувати різні типи завдань, спрямованих на підвищення рівня безпеки, до яких відносяться [5]:

1. Інспекція та моніторинг: БПЛА, оснащені камерами, тепловізорами та іншими сенсорами, можна використовувати для виконання планових інспекцій і моніторингу ММР та територій ММР. Вони можуть забезпечити детальне спостереження за компонентами

та системами ММР та ділянками ММР, виявити будь-які аномалії чи несправності та допомогти виявити потенційні проблеми до їх загострення.

2. Розгортання Ad Hoc мереж: БПЛА може нести обладнання для збору даних передачі від ММР, вимірювальних станцій до диспетчерської/центру.

3. Безпека: БПЛА можуть використовуватися для охорони периметра та спостереження за об'єктами ММР як частина системи фізичного захисту. Вони можуть спостерігати за територією над і навколо зони розташування реакторів і виявляти будь-яку підозрілу активність, зловмисників або потенційні загрози.

4. Реагування на надзвичайні ситуації: у разі надзвичайної ситуації можна розгорнути БПЛА для швидкої оцінки ситуації та забезпечення обізнаності про ситуацію, наприклад, БПЛА можна використовувати для огляду та картографування місцевості на території ММР та навколо цієї області для оцінки наслідків аварії.

Розміри площадок розміщення складових ММР досить велика, а завдання БПЛА різноманітні, тому необхідно використовувати флоти БПЛА та створювати інфраструктуру для розміщення та обслуговування парку БПЛА. Ця інфраструктура має забезпечити тривалу експлуатацію БПЛА в автономних умовах і виконувати завдання:

- автономне планування польотів (маршрути, розклади, кількість БПЛА ред.);
- підзарядка/заміна акумулятора;
- зміна корисного навантаження;
- збір (та обробка) та передача даних до диспетчерської/кризового центру.

Крім того при створенні систем моніторингу необхідно враховувати те, що одиночний БПЛА, володіє відносно малими можливостями для виконання поставленого завдання (невеликий час польоту, обмежений бортовим енергоресурсом; невелике число функцій, що виконуються; невисока ймовірність виконання завдання в екстремальних ситуаціях і т.п.). Тому підвищення ефективності застосування систем моніторингу, побудованих на основі БПЛА має забезпечуватися за рахунок групового застосування їх складових.

Основними перевагами групового застосування БПЛА як роботизованих об'єктів у складі систем моніторингу є:

- розширений набір завдань, що виконуються;
- більша ймовірність успішного виконання завдань, яка досягається за рахунок можливості перерозподілу часткових завдань між БПЛА групи в разі відмов деяких з них.

Також, під час функціонування систем моніторингу може виникати необхідність у зміні її структури, складу, переліку завдань тощо. За таких умов застосування стандартних підходів до побудови систем моніторингу може привести до розгортання фактично нової системи. Для унеможливлення таких ситуацій необхідно передбачати можливість адаптації структури систем моніторингу під нові вимоги, умови виконання завдань та масштабування у ході виконання завдань.

Побудова адаптивної системи моніторингу має базуватись на застосуванні технологій, що забезпечують:

- спільне (групове) виконання завдань;
- адаптацію до нових вимог та умов;
- можливість нарощення (масштабування).

Варіативність завдань та умов їх виконання обумовлюють використання гнучких рішень під час створення систем моніторингу, до яких відносяться мультиагентні системи [6]. В інформаційній моделі мультиагентних систем використовуються онтології, які дозволяють описувати склад, стан та взаємодію між складовими мультиагентної системи. У роботі використовується розроблений варіант онтології у якості бази знань для МА-БПЛА-ММР-СМ, що містить можливі завдання, опис умов їх виконання, складові МА-БПЛА-ММР-СМ та їх обладнання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання синтезу систем моніторингу, використання мультиагентних технологій розглядаються в багатьох роботах. В [7] автори пропонують загальний алгоритм формування системи моніторингу для виконання різних завдань з урахуванням вимог. Загальний огляд використання мультиагентних технологій в різних галузях представлений в [8]. Використання мультиагентів для виконання завдань в різних галузях розглядається в [9,10]. В роботі [11] представляє огляд сучасного стану напрацювань в галузі розробки систем за основі знань у вигляді онтологій.

Але в даних роботах розглядаються загальні підходи до побудови систем без детального опису процедур формування їх структури та чисельності. Формалізація процесу визначення структури та складу мультиагентної системи зводиться до визначення порядку та способів вибору складових системи моніторингу (БПЛА, станцій обслуговування), які відповідають завданню та умовам його виконання і забезпечують виконання завдання з показниками якості не менше заданих, з урахуванням вектору різноманітних факторів.

**Метою роботи** є вдосконалення процесу синтезу інтелектуальних систем моніторингу об'єктів атомної енергетики та основі використання методу визначення структури та складу мультиагентних систем моніторингу та баз знань у вигляді онтологій.

### Виклад основного матеріалу

В основу підходу до побудови інтелектуальних систем моніторингу покладені принципи групового управління й наступні положення: кожен об'єкт системи моніторингу самостійно формує управління і визначає свої дії в поточній ситуації; вибір дій членами групи здійснюється тільки на основі інформації про загальну мету групи, ситуації в навколишньому середовищі на поточний момент часу, поточні стани і дії інших членів групи; в якості оптимальної дії члена групи розуміється дія, яка вносить максимальний внесок в досягнення спільної мети; допускається прийняття компромісних рішень.

Характеристиками інтелектуальних «агентів», під яким розуміються БПЛА та інші складові систем моніторингу, які приймають участь у виконанні завдань, є здатність до колективної цілеспрямованої поведінки в інтересах розв'язання одного завдання; самостійного вирішення локальних завдань; активних дій з метою досягнення загальних і локальних цілей; переміщення та пошуку інформації та об'єктів, які необхідні для колективного рішення загального завдання; автоматичної адаптації до невизначених умов в середовищі, що змінюється.

Ці можливості кардинально відрізняють мультиагентні системи від існуючих «жорстко» організованих систем управління БПЛА. При мультиагентному підході БПЛА виконують функції «агентів», які за допомогою спеціального програмного забезпечення та датчиків збирають дані, оцінюють ситуацію, приймають рішення на дії та взаємодіють з іншими «агентами».

Різнманітність завдань, вимог до їх виконання, умов виконання, наявних ресурсів обумовлюють побудову МА-БПЛА-ММР-СМ у вигляді холонічних мультиагентних систем, що базуються на концепції холізму [12]. В рамках цієї концепції цілісність системи створюється в результаті динамічної взаємодії автономних компонент – холонів, кожен з яких в свою чергу може бути системою (підсистемою або окремим об'єктом) і складатися з інших холонів. При появі всередині системи нових завдань холони можуть здійснювати постійний аналіз своїх потреб і можливостей, конкурувати між собою або кооперуватися для досягнення поставлених цілей.

Структуру концептуальної моделі холонічної МА-БПЛА-ММР-СМ наведено на рис. 1.

Інтелектуальну МА-БПЛА-ММР-СМ пропонується реалізувати у вигляді багаторівневої трикомпонентної холонічної мультиагентної системи, яка складається з трьох рівнів-холонів, кожен з яких в свою чергу може складатися з декількох інших холонів [13]:

- холон керування, який обробляє потік завдань, формує заявку на її виконання та передає її до холону виконання. Також він контролює наявність вільних ресурсів, та у разі їх відсутності ставить завдання в чергу;

- холон виконання завдань, яких обробляє отриману від холону керування заявку і формує робочий холон, який необхідний для її виконання з урахуванням вимог та умов. В холоні виконання завдань може оброблятися декілька заявок, тому він може складатися з декількох робочих холонів. Активні холони, що виконують замовлення складаються з БПЛА-агентів. У разі відсутності ресурсів для виконання заявки холон виконання інформує про це холон управління;

- холон забезпечення, формує окремі холони підтримки для обслуговування холонів виконання у разі, якщо це необхідно. Рішення про необхідність створення холону підтримки формує холон виконання завдань. Складові холони підтримки можуть бути представлені системами заряджання (заміни) джерел живлення БПЛА-агентів холону виконання завдань. У разі відсутності ресурсів для обслуговування робочих холонів холон обслуговування інформує про це холон виконання.

Порядок формування робочих холонів та холонів підтримки буде розглянуто нижче. Обмін інформацією у системі моніторингу може здійснюватись як між холонами одного рівня, а також через загальну базу знань. Застосування запропонованого підходу до побудови системи моніторингу дозволяє одночасно виконувати декілька різних завдань, застосовуючи для цього різні автономні холони без необхідності виконання складних процедур структурного синтезу. Особливість формування структури та складу МА-БПЛА-ММР-СМ полягає в тому, що для задоволення вимог місії необхідно визначати базову (опорну кількість) БПЛА в складі холону, а також склад холону забезпечення, які можуть змінюватись. Наприклад, при розширенні периметру охорони необхідно додати до холону БПЛА потрібну кількість БПЛА і, у разі необхідності, змінити склад холону забезпечення, без створення нової місії. Пропонується наступний метод визначення структури та складу МА-БПЛА-ММР-СМ, узагальнений алгоритм якого представлено на рис. 2. Даний алгоритм описує послідовність дій формування опорних холонів.

*Блок 1.* Надходження нової місії та аналіз вимог і поточної обстановки.

*Блок 2.* Вибір БПЛА, які здатні виконувати завдання місії, та визначення їх кількості, що задовольнить вимоги.

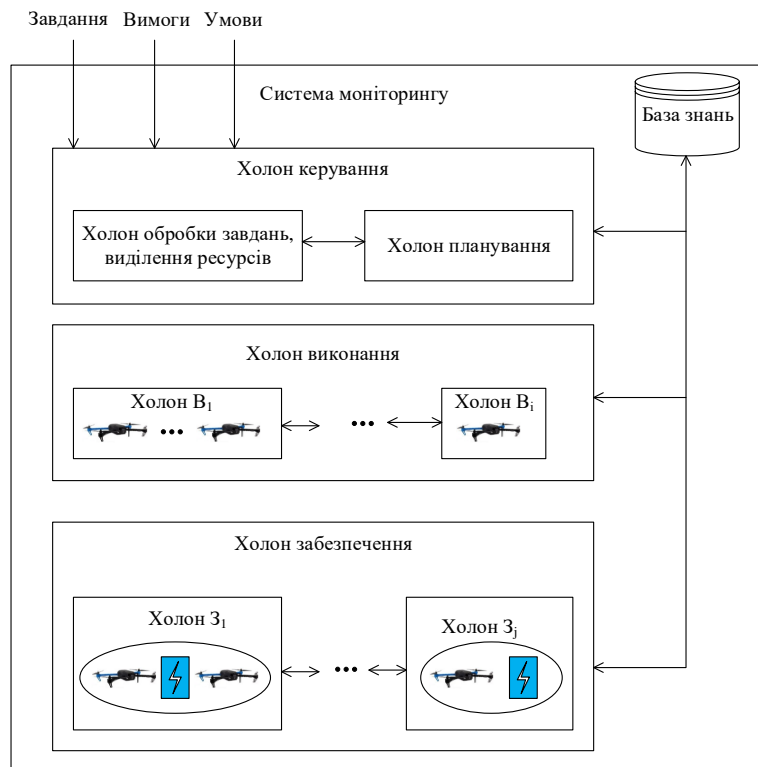


Рис. 1. Концептуальна модель холонічної МА-БПЛА-ММР-СМ

*Блок 3.* Порівняння часу, необхідного для виконання місії, та максимальної тривалості польоту БПЛА. Якщо умова виконується здійснюється формування складу холонів для виконання місії (блок 4).

У випадку перевищення часу, необхідного для виконання місії, над максимальною тривалістю польоту обираються станції, які здатні обслуговувати вибрані БПЛА, та визначається їх кількість (блок 5), які формують холон обслуговування, що додається складу холонів для виконання місії.

*Блок 4.* Формування складу холонів для виконання.

Ситуаційне створення структури складних систем для конкретних завдань може здійснюватись з урахуванням різноманітних параметрів у конкретній об'єктній області. Перспективною прямою формалізацією таких знань є розробка онтологій.

Онтологія — це формалізоване представлення знань про одну предметну область (навколишнє середовище, світ), додаток для автоматизованої обробки. Він вибирає мову для опису предмета задачі синтезу та включає машинну інтерпретацію основної формули для розуміння та розуміння між ними.

Структура опису ресурсу (RDF-resource definition framework) дозволяє писати машинно інтерпретовані оператори у формі трійок суб'єкт-предикат-об'єкт, які називаються трійками RDF. Для опису можна використовувати різні синтаксиси, серед яких - RDF/XML, Turtle, N-Triples, JSON-LD, RDFa та HTML5 Microdata.

Такі RDF-трійки піддаються машинній інтерпретації та, за суворими правилами, можуть використовуватись для отримання нових тверджень на основі тих, що сформульовані автоматизованими міркуваннями.



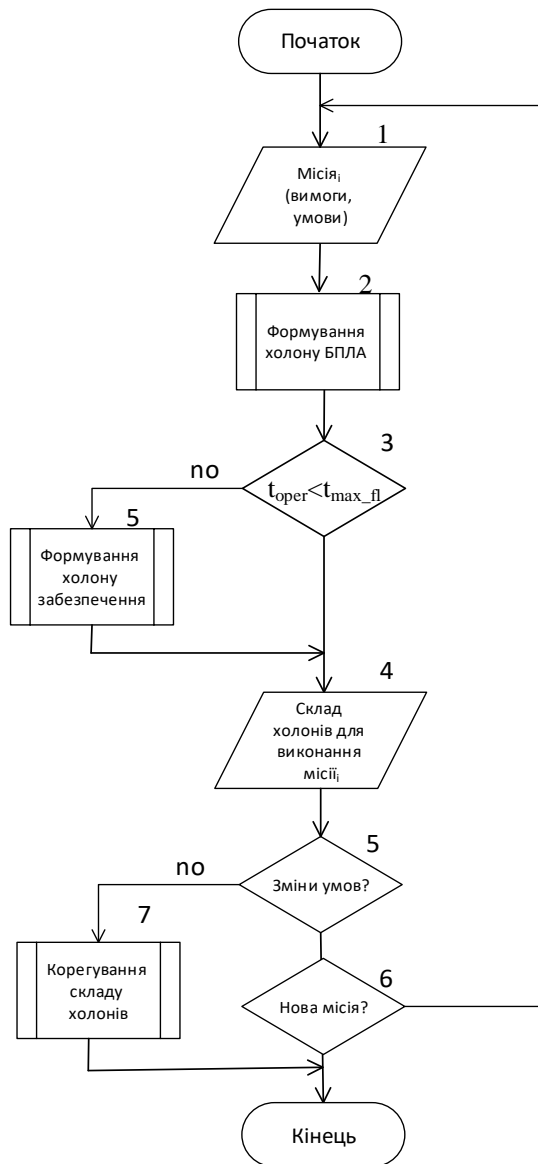


Рис. 2. Узагальнений алгоритм методу визначення структури та складу МА-БПЛА-ММР-СМ

Але складні домени вимагають ще більше репрезентативних можливостей, таких як обмеження кардинальності властивостей, обмеження домену та діапазону, а також перелічувані класи, що призвело до появи мови веб-онтологій (OWL - ontology web language), спеціально розробленої для створення веб-онтологій із багатим набором моделювання. конструкторів і усуває обмеження RDF.

Кожна онтологія OWL складається з трійок RDF, які визначають поняття (класи), ролі (властивості та зв'язки) та екземпляри [14].

Існують онтології верхнього рівня, які визначають загальний фундаментальний опис області застосування, онтології предметної області та онтології рівня прикладного завдання. Чим нижче рівень, тим повніший опис містить онтологія.

Онтологічна модель МА-БПЛА-ММР-СМ для виконання завдань забезпечення фізичної безпеки описує структуру та взаємодію складових елементів системи при виконанні завдань у різних умовах. В онтології використовується наступна ієрархія класів:

- Mission type:
  - Security;
- Performing unit:
  - Simple UAV;
  - Custom UAV;
- Support unit:
  - Automatic battery maintenance station (ABMS);
- Payload:
  - Camera;
  - FLIR;
- Environment conditions:
  - Day;
  - Night.

Цей перелік класів і підкласів може бути розширений залежно від особливостей системи моніторингу.

Опис властивостей об'єкта, визначених в онтології, представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Опис властивостей об'єктів, визначених в онтології

Домен	Властивість	Діапазон
UAV	perform	Mission type
ABMS	maintenance	Simple UAV; Custom UAV
Simple UAV	has	Camera; FLIR
Camera; FLIR;	deployed	Custom UAV
Security	use	Camera; FLIR
Camera	used	Day
FLIR	used	Night

Для створення онтологій використовувалося програмне забезпечення Protégé. Онтограф розробленої онтології рівня прикладного завдання для МА-БПЛА-ММР-СМ представлений на рис. 3. Для уточнення онтології до її наступних класів було надано індивідууми, з конкретними характеристиками:

- Simple UAV:
  - Simple UAV 1;
  - Simple UAV 2;
  - Simple UAV 3;
- Custom UAV:
  - Custom UAV 1;
  - Custom UAV 2;
- ABMS:
  - ABMS 1;
  - ABMS 2;
  - ABMS 2;
- Payload
  - Camera
    - Camera1;
    - Camera2;
  - FLIR:
    - FLIR1;
    - FLIR2.

OWL-коди доданих індивідуумів для класу Simple UAV, представлені на рис. 4.

Розглянемо приклад використання онтології для вибору обладнання, БПЛА та підсистеми забезпечення, у разі необхідності, необхідних для виконання завдання охорони периметру тривалістю не менше 2 годин, вночі за вітру, що має швидкість 12 м/с.

Для визначення компонентів системи моніторингу до онтології використовується SPARQL запит, вигляд якого наведено на рис. 5.

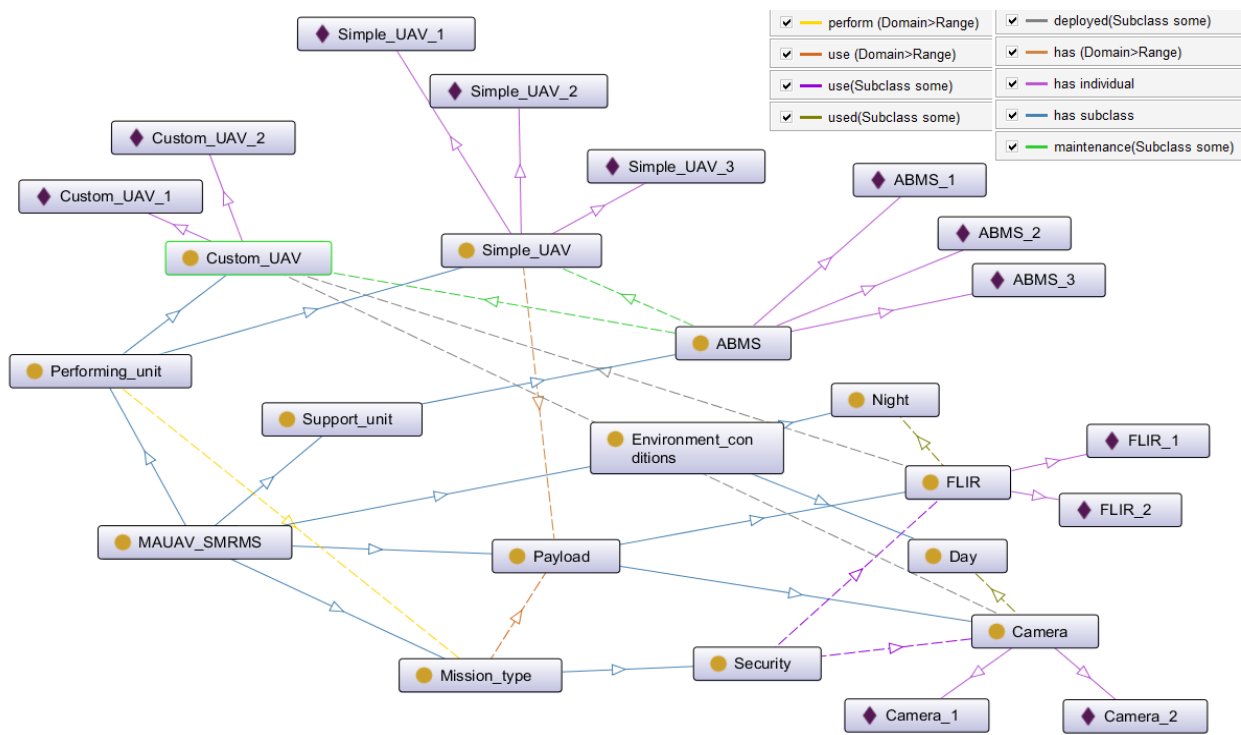


Рис. 3. Онтограф онтології рівня прикладного завдання для МА-БПЛА-MMP-СМ

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_1 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_1">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV"/>
  <ims:flightEndurance rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">0.5</ims:flightEndurance>
  <ims:maxWind rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">10</ims:maxWind>
  <ims:payload1 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">Camera1</ims:payload1>
</owl:NamedIndividual>
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_2 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_2">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV"/>
  <ims:flightEndurance rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">0.75</ims:flightEndurance>
  <ims:maxWind rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">12</ims:maxWind>
  <ims:payload1 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">FLIR1</ims:payload1>
</owl:NamedIndividual>
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_3 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_3">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV"/>
  <ims:flightEndurance rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">1.0</ims:flightEndurance>
  <ims:maxWind rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">15</ims:maxWind>
  <ims:payload2 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">Camera2</ims:payload2>
</owl:NamedIndividual>
    
```

Рис. 4. OWL-коди доданих екземплярів для класу Simple UAV

```

PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
PREFIX ims: <http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#>
SELECT ?payload ?UAV ?ABMS
WHERE{
  ?payload rdf:type :Payload.
  ?UAV :has ?payload
  FILTER EXISTS {?payload :used 'Night'}
  FILTER EXISTS ((?UAV :maxWind > =12))
  ?ABMS maintenance ?UAV
  FILTER EXISTS ((?UAV :flightEndurance < 2))
    
```

Рис. 5. SPARQL запит до онтології

За результатами запиту надається перелік корисного навантаження, яке використовуються при виконанні завдання в нічних умовах, БПЛА, які мають це корисне навантаження та можуть виконувати польоти при швидкості вітру більше 12 м/с.

В онтології є лише один екземпляр класу Simple UAV – «Simple UAV 2», що може здійснювати польоти при швидкості вітру 12м/с, і який обладнаний камерою FLIR1, що дозволяє виконувати завдання вночі. Максимальна тривалість польоту «Simple UAV 2» складає 0,75 годин, тоді як необхідно виконувати завдання 2 години, що обумовлює використання підсистеми забезпечення, а саме

«ABMS 2», яка призначена для обслуговування БПЛА «Simple UAV 2».

Наступні кроки полягають у визначенні необхідної кількості БПЛА та станцій обслуговування.

В рекомендаціях з організації фізичного захисту ММР закладено необхідність реалізації концепції безперервного захисту за рахунок створення суцільного поля спостереження за зоною обмеженого доступу, або периметру захищеної зони ММР.

Кількість БПЛА, яка необхідна для цього визначається з урахуванням розмірів зони перегляду

камери БПЛА, яка залежить від характеристик оптичного навантаження та вимог до розрізняювальної здатності (рис. 6).

Якщо розглядати застосування БПЛА як додатковий елемент системи фізичного захисту, то такий підхід є дуже витратним, крім того використання БПЛА як основної системи може бути неможливим в умовах природних явищ, що унеможливають здійснення польотів, наприклад при швидкості вітру більше ніж 10-15 м/с, або в умовах, що приводять до обledenіння елементів конструкції БПЛА.

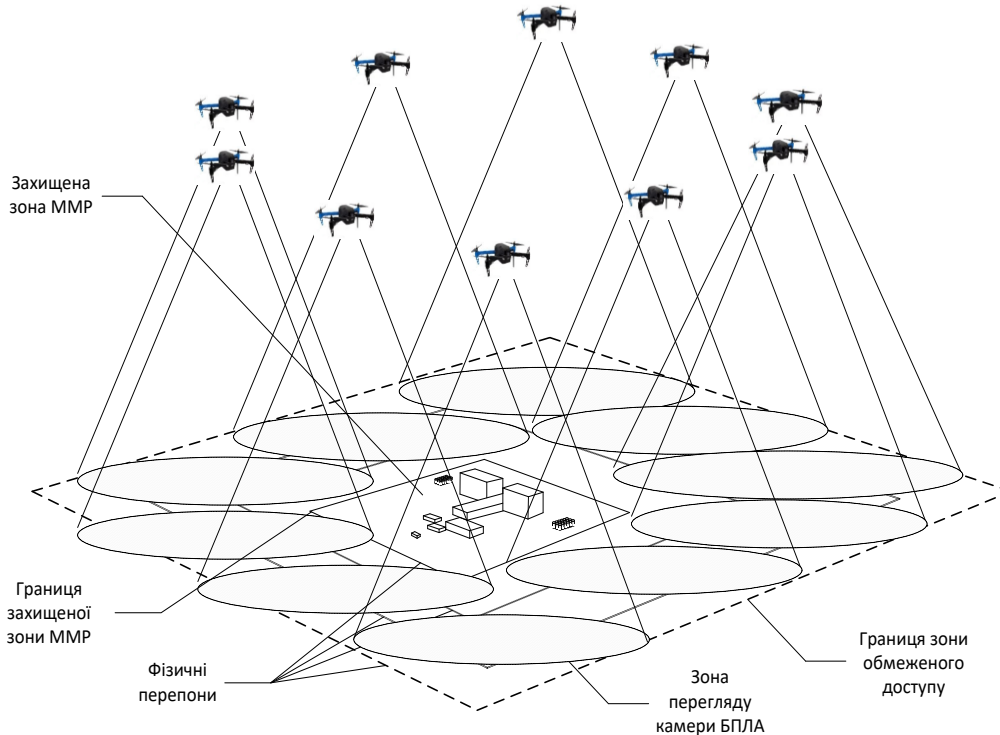


Рис. 6. Модель повного покриття зони обмеженого доступу засобами моніторингу БПЛА

В даній роботі пропонується модель функціонування МА-БПЛА-ММР-СМ у якості допоміжного засобу виконання завдань охорони периметру, яка передбачає періодичний моніторинг захисної зони.

В основу побудови системи фізичного захисту ММР покладено три складові [15]: виявлення; затримка; реагування. При цьому затримка використовується також для підвищення імовірності виявлення, тому при розробці комплексу заходів з фізичного захисту навколо захисної зони ММР розміщують декілька перепон різного типу, наприклад: сітка «рабиця», як перший (зовнішній) рівень; огорожа з колючого дроту, як другий рівень; малозамітна перепона, як третій рівень; бетонний паркан, як останній (внутрішній) рівень. Комплекс перепон характеризується стійкістю до проникнення  $T_d$ , яка визначається сумарним часом, необхідним для їх долання:

$$T_d = \sum_{i=1}^{n_o} t_{o\_c_i}, \quad (1)$$

де  $t_{o\_c_i}$  - середній час долання  $i$ -ї перепони;  $n_o$  - кількість перепон.

Для забезпечення умов виявлення порушника необхідно здійснювати моніторинг периметру з

інтервалом  $T_m$  меншим ніж стійкість комплексу перепон, тобто має виконуватись умова:

$$T_d / T_m > 1. \quad (2)$$

Інтервал моніторингу залежить від розмірів периметру захищеної зони ММР, кількості та льотно-технічних характеристик БПЛА, які рухаються по маршруту (вважається, що БПЛА розташовані по всьому маршруту рівномірно), і визначається як:

$$T_m = P_z / (m_{UAV} V_{UAV}), \quad (3)$$

де  $P_z$  - периметр захищеної зони ММР;  $V_{UAV}$  - швидкість БПЛА;  $m_{UAV}$  - кількість БПЛА на маршруті.

Таким чином, для забезпечення умов виявлення порушника (2) необхідно щоб кількість БПЛА, що знаходяться на маршруті, відповідала умові:

$$m_{UAV} > P_z / (T_d V_{UAV}). \quad (4)$$

Зазвичай тривалість виконання завдань моніторингу є значно більшою, ніж максимальна тривалість польоту БПЛА, тому виникає необхідність у періодичній заміні, або заряджанні бортових джерел живлення БПЛА. Для забезпечення безперервності процесу моніторингу у такому випадку необхідно

використання додаткових БПЛА, які будуть продовжувати виконувати завдання замість БПЛА, які обслуговуються. Функціонування БПЛА при виконанні завдань з фізичного захисту за такою схемою представлено на рис. 7.

Зазвичай в складі системи моніторингу використовуються група БПЛА, з однаковими характеристиками, тому потребувати обслуговування вони будуть всі одночасно, і необхідно залучати додаткову групу такої ж чисельності.

Час виконання завдання з моніторингу одним БПЛА визначається за формулою:

$$t_m = t_{fl} - 2S_{UAV} / V_{UAV} - t_{conf}, \quad (5)$$

де  $t_{fl}$  - середній час польоту БПЛА;  $S_{UAV}$  - відстань яку долає БПЛА від точки на маршруті до станції обслуговування (вважається, що всі точки маршруту рівновіддалені від станції);  $t_{conf}$  - час, необхідний для підключення БПЛА після обслуговування до системи моніторингу. Чисельність груп БПЛА, що необхідна для виконання завдань з фізичної безпеки, складі МА-БПЛА-ММР-СМ визначається за формулою:

$$k_{UAV} = \left\lceil 1 + \left( 2S_{UAV} / V_{UAV} + t_{conf} + t_{repl\_bat} \right) / t_m \right\rceil, \quad (6)$$

де  $t_{repl\_bat}$  - час необхідний для заміни бортового джерела живлення БПЛА.

Загальна кількість БПЛА, що має залучатися до холоду виконання завдань фізичного захисту в складі МА-БПЛА-ММР-СМ визначається за формулою

$$m_{\Sigma} = k_{UAV} \cdot m_{UAV}. \quad (7)$$

Значення  $k > 1$  вказує на необхідність створення в складі МА-БПЛА-ММР-СМ холоду забезпечення. Тип станції визначається при виконанні SPARQL запит до онтології, а кількість станції залежить від кількості каналів обслуговування БПЛА та є таким:

$$m_{ABMS} = \lceil m_{UAV} / n_{ch} \rceil \quad (8)$$

де  $n_{ch}$  - кількість каналів обслуговування БПЛА на одній станції обраного типу.

Наведений приклад показує послідовну реалізацію методу формування структури та складу МА-БПЛА-ММР-СМ для виконання визначеного завдання та умов. Для врахування вимог до надійності при відмовах БПЛА необхідно резервувати додаткову кількість БПЛА з загальної чисельності флоту, які у разі відмов основних БПЛА зі складу холоду будуть залучатися до його поповнення. Для визначення їх чисельності використовуються додаткові моделі [16].

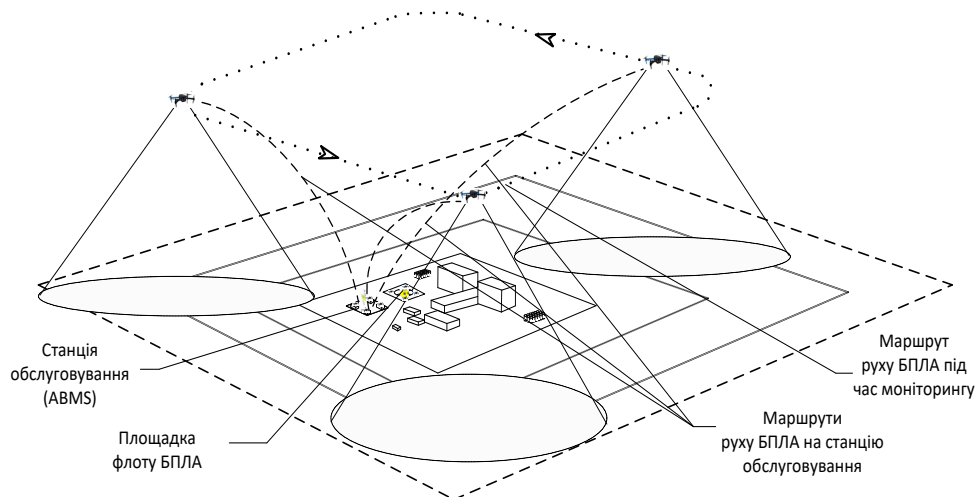


Рис. 7. Модель періодичного моніторингу зони обмеженого доступу засобами БПЛА

## Висновки

В роботі розглянуто процес формування систем моніторингу на основі БПЛА, для реалізації якого запропоновано метод визначення структури та складу МА-БПЛА-ММР-СМ, який дозволяє підвищити ефективність процесу синтезу інтелектуальних систем моніторингу об'єктів атомної енергетики для виконання різноманітних завдань з урахуванням вимог та умов навколишнього середовища. Розроблена і описана концептуальна модель холодної МА-БПЛА-ММР-СМ та варіант онтологічної бази знань.

Розроблено та описано метод визначення структури та складу МА-БПЛА-ММР-СМ, який базується на концептуальній моделі холодної МА-БПЛА-ММР-СМ та використовує онтологічну базу знань виведення необхідних знань під час синтезу МА-БПЛА-ММР-СМ. При цьому враховується необхід-

ність формування підсистеми виконання завдань у вигляді холонів БПЛА та холонів забезпечення тривалого функціонування МА-БПЛА-ММР-СМ.

Розглянуто можливі варіанти здійснення моніторингу фізичної безпеки інфраструктури ММР та запропонована модель функціонування МА-БПЛА-ММР-СМ з періодичним покриттям зони обмеженого доступу, яка дозволяє визначати необхідну чисельність БПЛА та станцій обслуговування.

Надано приклад використання запропонованого методу для формування структури та складу МА-БПЛА-ММР-СМ при виконанні завдань моніторингу у складі системи фізичного захисту ММР.

Напрямок подальших досліджень полягає у розробці методу вибору та імплементації моделей, необхідних для визначення потрібної чисельності БПЛА в МА-БПЛА-ММР-СМ для забезпечення заданих показників надійності виконання завдань.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. P. G. Martin, O. D. Payton, J. S. Fardoulis, D. A. Richards, Y. Yamashiki, T. B. Scott. Low altitude unmanned aerial vehicle for characterising remediation effectiveness following the FDNPP accident. *J. Env. Radioactivity*, 2016, vol. 151, pp. 58–63.
2. H. Fesenko, I. Kliushnikov, V. Kharchenko, S. Rudakov, E. Odarushchenko. "Routing an Unmanned Aerial Vehicle during NPP Monitoring in the Presence of an Automatic Battery Replacement Aerial System". In Proc. of the IEEE 11th Int. Conf. on DESSERT 2020. Kyiv, Ukraine, May 14-18, 2020, pp. 34–39. <https://doi.org/10.1109/DESSERT50317.2020.9125080>.
3. Fukushima looks to drones. *Nuclear Engineering International*. URL: <https://www.neimagazine.com/features/>
4. Now Available: New Drone Techn. for Radiological Monitoring in Emergency Situations. IAEA. URL: <https://www.iaea.org>
5. M. Gaspar. Technology Neutral: Safety and Licensing of SMRs. IAEA. URL: <https://www.iaea.org/ru/newscenter/news/>
6. V.M. Chernenkiy, Y.E. Gapanyuk, V.I. Terekhov, G.I. Revunkov, Y.S. Fedorenko, J. C. Gonzalez Gusev The Concept of Teaching Course on Intelligent Information Systems. In Handbook of Research on Engineering Education in a Global Context // ed. by E.V. Smirnova, R.P. Clark. IGI Global, 2019, pp. 346-357543 DOI: 10.4018/978-1-5225-3395-5.ch029.
7. I. Kliushnikov, H. Fesenko, V. Kharchenko, O. Iliashenko, O. Morozova. "UAV fleet based accident monitoring systems with automatic battery replacement systems: Algorithms for justifying composition and use planning". *International Journal of Safety and Security Engineering*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 319-328. <https://doi.org/10.18280/ijss.110404>.
8. V. Julian and V. Botti. Multi-Agent Systems. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 7, p. 1402, <https://doi.org/10.3390/app9071402>. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/app9071402>
9. K. Mehmet Tugrul, Drone Technologies and Applications. In *Drones - Various Applications* // ed. by D. Cvetkovi, IntechOpen, 2023, pp.1-24. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1001987>.
10. M. Herrera, A. K. Parlikad, J. Izquierdo, M. Perez Hernandez. Multi-Agent Systems and Complex Networks: Review and Applications in Systems Engineering. *Processes*, 2020, no. 8(3), <https://doi.org/10.3390/pr8030312>
11. M. M. Sulaeman, M. Harsono. Supply Chain Ontology: Model Overview and Synthesis. *Jurnal Mantik*, vol. 5(2), 2012, pp. 790-799. <https://doi.org/10.35335/mantik.Vol5.2021.1401.pp790-799>.
12. S. Rodriguez, V. Hilaire, N. Gaud, S. Galland, A. Koukam. *Holonic Multi-Agent Systems, Self-organising Software*. Natural Computing Series, Berlin: Springer, 2011, pp. 238–263.
13. D. Li, S.S. Ge, W. He, G. Ma, L. Xie. Multilayer formation control of multi-agent systems', *Automatica*, 2019 vol. 109, pp.1-15. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2019.108558>
14. Web Ontology Language. W3C Semantic Web. URL: <https://www.w3.org/OWL/>
15. A. Evans, C. Byrum, D. Stanford, E. Sandt, T. Goolsby. Physical Protection Recommendations for Small Modular Reactor Facilities. SANDIA REPORT, SAND2021-15712, 2021, 56 p.
16. I. Kliushnikov, V. Kharchenko, H. Fesenko, E. Zaitseva. Multi-UAV Routing for Critical Infrastructure Monitoring Considering Failures of UAVs: Reliability Models, Rerouting Algorithms, Industrial Case. In Proc. of Int. Conf. on Inf. and Digital Technologies, IDT'2021, Zilina, Slovakia, 2021, pp. 303–310. <https://doi.org/10.1109/IDT52577.2021.9497624>

Received (Надійшла) 16.10.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.11.2023

**Method for determining the structures and composition of multi-agent UAV-based monitoring systems for small modular reactors**

Ihor Kliushnikov

**Abstract.** The accident at the nuclear power plant (NPP) in Fukushima showed that the use of monitoring systems based on unmanned aerial vehicles (UAVs) made it possible to assess the consequences of the accident and conduct post-accident monitoring of the NPP infrastructure and the surrounding area. However, the deployment of such a monitoring system was carried out after the accident, when there were no other opportunities to obtain information. In addition, the process of creating and deploying such systems, which are unique, are designed to monitor a specific site. The spread of the use of UAVs in various fields shows that they can be used as flexible services to perform various tasks in an autonomous mode, which requires the introduction of means for their intellectualization. One of the areas of development of nuclear energy is small modular reactors (SMRs) and the use of UAVs as part of SMR infrastructure monitoring systems will allow solving a wide range of problems. The subject of the article is the process of forming monitoring systems based on UAVs. The purpose of the article is to propose an approach to improving the process of synthesis of intelligent monitoring systems for nuclear power facilities. Objective of the article: to propose a method for determining the structure and composition of multi-agent UAV-based monitoring systems (MA-UAV-MS) to perform various tasks taking into account the requirements and environmental conditions, for which to develop a conceptual model of the holonic MA-UAV-MS and a knowledge base in the form ontologies to derive the necessary knowledge during the synthesis of MA-UAV-MS; give an example of using the proposed method for forming the MA-UAV-SM structure when performing SMR monitoring tasks (MA-UAV-SMR-MS), namely, monitoring as part of the SMR physical protection system. The following results of the work are obtained. A conceptual model of the holonic MA-UAV-SMR-MS has been developed and described. A method for determining the structure and composition of the MA-UAV-SMR-v has been developed and described. This takes into account the need to form a subsystem for performing tasks in the form of UAV holons and holons to ensure the long-term functioning of the MA-UAV-SMR-MS. A version of the ontological knowledge base is developed and an example of its use is shown to obtain a list of UAVs and equipment necessary to perform tasks in certain conditions with specified requirements. Possible options for monitoring the physical security of the SMR infrastructure are considered and a model for the operation of MA-UAV-SMR-MS with periodic coverage of the restricted access zone is proposed, which allows us to determine the required number of UAVs and service stations. The further research is to develop a method for selecting and implementing the models necessary to determine the required number of UAVs in the MA-UAV-SMR-MS to ensure the specified reliability indicators for performing tasks.

**Keywords:** monitoring system; holonic multi-agent system; ontology; unmanned aerial vehicle; service station; small modular reactor; physical protection.

В. О. Мартовицький, О. А. Янковський, А. А. Коваленко, О. М. Севостьянова

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНО-АПАРАТНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ АВТОМАТИЧНОГО РАДІОПЕЛЕНГАТОРА

**Анотація.** Стаття присвячена детальному розгляду архітектури програмно-апаратної моделі системи вимірювання кутів автоматичного радіопеленгатора. В статті розкривається функціональність антен, приймально-передавальних блоків, блоків обробки сигналу та визначення кутів. Особлива увага приділяється взаємодії програмного та апаратного забезпечення для забезпечення оптимальної продуктивності системи. Архітектура програмно-апаратної моделі системи вимірювання кутів автоматичного радіопеленгатора є ключовим аспектом у розробці та ефективному функціонуванні радіотехнічної системи ближньої навігації. Ця модель визначає структуру та взаємодію програмного та апаратного забезпечення, які використовуються для точного вимірювання кутів при отриманні радіопеленгації. В статті представлено реалізацію для моделювання приймача ADF, який є частиною з аналізом з точки зору навчальних цілей. Модель охоплює: функції системи, основні етапи обробки та необхідні контрольні точки. Змодельовані системи поєднуються з персональним комп'ютером для керування різними режимами роботи і виконують необхідні обчислення для процесу навігації. Модель може бути розширена, щоб охопити нові модулі для інших навігаційних систем авіоники.

**Ключові слова:** РСБН, радіопеленгатор, авіоніка, навігація, вимірювання кутів.

### Вступ

Авіація та авіаперевезення відіграють ключову роль у сучасній світовій економіці та соціальній сфері, а саме:

– авіаперевезення забезпечують швидкий та ефективний глобальний зв'язок між країнами та континентами, дають змогу людям переміщуватися на великі відстані за короткий час і забезпечують необхідний зв'язок для бізнесу, туризму та культурного обміну;

– авіація відіграє важливу роль у стимулюванні економічного зростання та підтримує світову торгівлю, забезпечує глобальну логістику і зв'язок між бізнес-партнерами, створює робочі місця і сприяє розвитку інфраструктури;

– авіаперевезення вантажів мають стратегічне значення для світової торгівлі: багато товарів, особливо високотехнологічних і таких, що переживають швидке застарівання, доставляють у різні країни та регіони саме авіацією через її швидкість;

– авіація відіграє ключову роль у розвитку туризму: мільйони людей щороку використовують авіаперевезення для подорожей у різні країни, що сприяє культурному обміну, розвитку місцевої індустрії та зміцненню економічних зв'язків.

Для забезпечення надійного та ефективного використання літаків та послуг авіації взагалі, дедалі більшого значення набуває матеріально-технічне забезпечення [1–3]. Невід'ємним компонентом такого матеріально-технічного забезпечення є радіотехнічні системи ближньої навігації (РСБН).

Так як життєвий цикл наявної наземної та бортової радіонавігаційної апаратури РСБН підходить до кінця і потребує заміни, необхідно закласти фундамент для подальшої інтеграції державної авіації у міжнародне авіаційне співтовариство. Тому **актуальною задачею** є дослідження принципів роботи обладнання РСБН.

Для тестування принципів роботи бортового обладнання РСБН, необхідно імітувати сигнал, що

генерується з наземного маяка, який повинен бути змодельований як стимуляція до бортового радіолокаційного обладнання, що дозволило б виявити і вивчити робочий стан бортового обладнання.

Враховуючи особливості роботи РСБН, генератор сигналів довільної форми не може коректно реалізувати функцію комунікації між бортовим обладнанням та наземною станцією, оскільки потрібен аналізатор сигналів для додаткової демодуляції та декодування. Спеціалізована контрольно-вимірвальна апаратура, у свою чергу, має низку недоліків: унітарна функція, великі габарити, значне енергоспоживання, складність у системній інтеграції та незручність побудови автоматичної тестової системи.

**Метою статті** є розробка архітектури програмно-апаратної моделі системи вимірювання кутів автоматичного радіопеленгатора для розв'язання проблеми ознайомлення з навігаційними засобами в авіації.

### Програмно-апаратна модель наземного обладнання РСБН

Швидкий розвиток сучасної мікроелектроніки дає змогу використовувати мікроконтролери у різних сферах. Серія мікроконтролерів для змішаних сигналів містить на кристалі багатий набір компараторів, операційних підсилювачів, дельта-сигма аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), АЦП послідовного наближення. Крім того, в сучасних конструкціях широко використовуються цифро-аналогові перетворювачі з діапазоном оновлення понад 1 ГГц, що дає змогу налаштувати функцію генерації сигналів. Тому сучасні технології в сфері мікроелектроніки були закладені в основу програмно-апаратної моделі.

Запропонована програмно-апаратна модель наземного обладнання РСБН включає в себе наступні компоненти:

1) персональний комп'ютер, який призначений для початкового налаштування та керування симулятором навігаційних модулів, який реалізова-

но на базі сімейства 32-бітних мікроконтролерів виробництва STMicroelectronics;

2) модуль системи вимірювання кутів автоматичний радіопеленгатор (ADF);

3) модуль синтезатора частоти, що забезпечує необхідні частоти для різних підсистем симуляції та забезпечує повну синхронізацію програмно-апаратної моделі.

При розробці моделі були використані цифрові компоненти мікроелектроніки. Тому при дослідженнях були використані моделі цифрових сигналів. Також аналогові моделі є більш складнішими порівняно з цифровими і вимагають використання спеціальних і дорогих мікросхем, таких як аналогові помножувачі та змішувачі, з великою ретельністю у виборі та реалізації компонентів [4].

Основна ідея цього недорогого та ефективного рішення полягає в застосуванні універсальної генерації функцій з використанням збережених цифрових даних і цифро-аналогового перетворення. Проблема

моделювання процесу амплітудної модуляції (AM) розв'язується за допомогою цифрових мікросхем замість діодних або транзисторних модуляторів.

### Функціональна схема системи ADF програмно-апаратної моделі наземного обладнання РСБН

Принцип вимірювання напрямку за відносним пеленгом на станцію [5] наведено на рис. 1, схему відповідного приймача – на рис. 2.

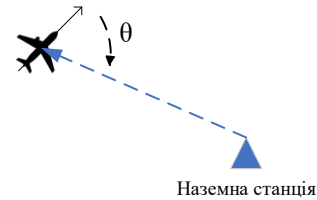


Рис. 1. Схема принципу вимірювання напрямку за відносним пеленгом на станцію

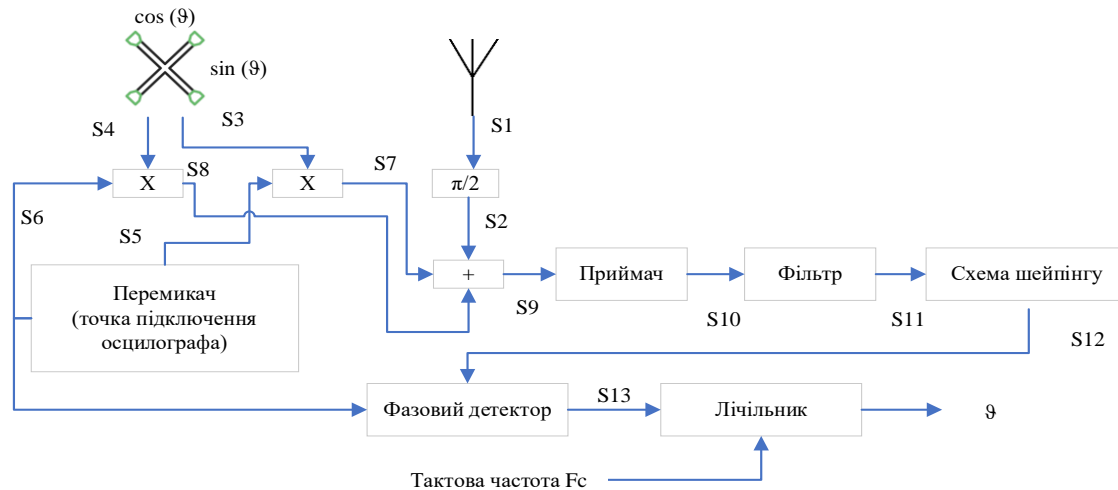


Рис. 2. Функціональна схема приймача ADF

Опис та технічні характеристики програмно-апаратної моделі комплексу є наступними:

– навігаційна система середнього діапазону: (100 - 2000) кГц;

– працює з наземними засобами як радіомаяк самонаведення, а також як передавач радіонавігаційної точки (RNP);

– його бортова частина складається з: петльової антени, діаграми спрямованості якої є або однією вісімкую, або двома перехрещеними петлями та всенаправленої антени;

– приймача, який використовується для підсилення та детектування сигналу від комбінованої антени, а потім для отримання керуючого сигналу для орієнтації петлі-мінімуму на напрямок сигналу в системі рухомого типу або для обробки квадратурних сигналів в системі вказівного типу (2, 3);

– підсистеми відображення.

З функціональної схеми приймача ADF обираємо наступні кроки моделювання сигналів:

**Крок 1.** Обробка сигналу стрижневої антени (зсув фаз  $\pi/2$  використовується для компенсації  $\pi/2$  фази двопетльових антен):

$$S_1(t) = A \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$S_2(t) = A \sin(\omega t) \quad (2)$$

де  $\omega$  – частота середнього діапазону;  $f = 100 - 2000$  кГц.

**Крок 2.** Обробка сигналу рамкової антени:

$$S_3(t) = a A \sin(\omega t) \sin(\theta) \quad (3)$$

$$S_4(t) = a A \sin(\omega t) \cos(\theta) \quad (4)$$

**Крок 3.** Моделювання модулю перемикачання сигналів для внутрішньої модуляції:

$$S_5(t) = P(t) \quad (5)$$

$$S_6(t) = P(t - T/4) \quad (6)$$

де  $P(t)$  – прямокутний сигнал з періодом  $T$ , з низькою частотою  $F$  в діапазоні 30-100 Гц.

**Крок 4.** Моделювання модулю перемикачання сигналів:

$$S_7(t) = S_3(t) \times S_5(t) = a A P(t) \sin(\omega t) \sin(\theta); \quad (7)$$

$$S_8(t) = S_4(t) \times S_6(t) = a A P(t - T/4) \sin(\omega t) \cos(\vartheta). \quad (8)$$

**Крок 5.** Обчислення суми входів приймача:

$$S_9(t) = S_2(t) + S_7(t) + S_6(t) = \sin(\omega t) \times A(1 + P(t) \sin(\vartheta) + P(t - T/4) \cos(\vartheta)). \quad (9)$$

**Крок 6.** Демодуляція вихідного сигналу приймача:

$$S_{10}(t) = A[1 + P(t) \sin(\vartheta) + P(t - T/4) \cos(\vartheta)]. \quad (10)$$

**Крок 7.** Фільтрація виходу у вигляді першої гармонічної складової  $S_{10}(t)$  наступним чином:

$$S_{11}(t) = B \sin(\Omega t - \vartheta). \quad (11)$$

**Крок 8.** Формування вихідного сигналу схеми, який затриманою версією  $P(t)$  із затримкою  $\tau = \vartheta / \Omega$  обраховується наступним виразом:

$$S_{12}(t) = P(t - \tau). \quad (12)$$

**Крок 9.** Вихід фазового детектора - прямокутний імпульс тривалістю  $\tau$  як:

$$S_{13}(t) = Pa(t).$$

Пряме аналогове моделювання вимагає гене-

рації та обробки наступних форм сигналів:

1) несучий сигнал з квадратурними фазами, який імітує фази прийнятих сигналів від всенаправленої та рамкової антен;

2) сигнал  $\vartheta$  з різними вагами у вигляді синуса і косинуса напрямку, що моделює сигнали, які приймаються від петльової антени;

3) комутація двох сигналів від схрещених петлевих антенних з внутрішнім комутуванням квадратно-хвильовим сигналом;

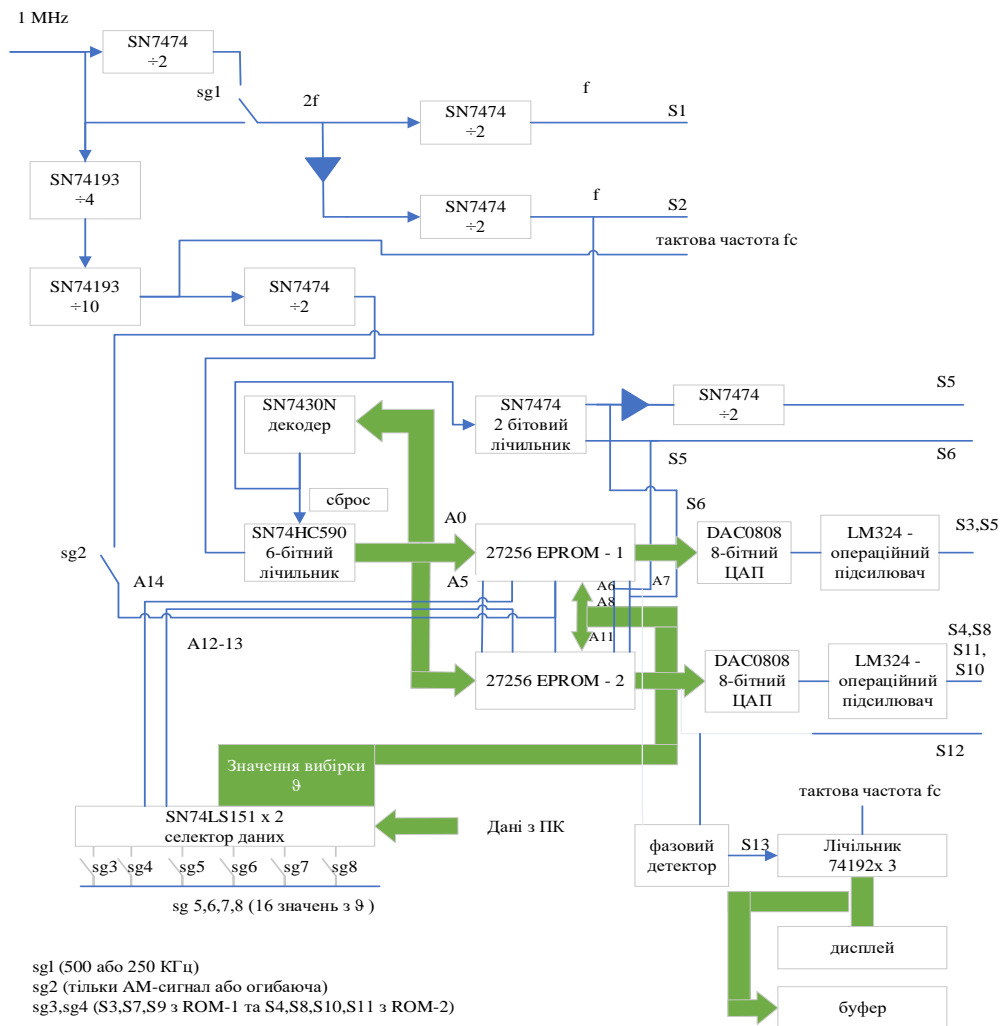
4) складання трьох антенних сигналів для отримання нормального АМ-сигналу;

5) виявлення та фільтрація виходу приймача;

6) цифрове фазове детектування та вимірювання вихідного сигналу приймача;

7) різні зміни напрямку  $\vartheta$  за допомогою комп'ютерного керування.

Аналогове моделювання буде дуже дорогим і вимагатиме складної схеми, тому простіший спосіб реалізації архітектури програмно-апаратної моделі наземного обладнання РСБН – це використання заздалегідь відсканованих сигналів від реального приймача з імітацією сигналу наземної станції, адаптованої до різних напрямів сигналу. Було розроблено архітектуру програмно-апаратної моделі наземного обладнання РСБН, яка представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Архітектура програмно-апаратної моделі наземного обладнання РСБН типу TACAN



Налаштування частоти здійснюється таким чином. Якщо лічильник фази видає 3 цифри для напрямку з кроком 10, йому потрібен тактовий сигнал частоти  $f_c = 360 F$ . Отже, маємо три значення частот:  $F$  перемикання, тактова  $f_c = 360 F$  та несуча  $f \gg F$ . Оскільки несучу частоту  $f$  вибрано як опорну частоту, бо вона є найвищою, інші частоти отримуються відповідним поділом, саму несучу можна вибрати поетапно для покриття діапазону.

Частотний поділ виконується за допомогою модулів частотного синтезатора, три частоти вибираються таким чином: несуча частота  $f$ ; несуча частота в діапазоні 200 – 2000 кГц може бути вибрана з двох значень 500 кГц і 250 кГц шляхом ділення 1 МГц на 2 і 4 відповідно; частота перемикання  $F$ , яку можна отримати, поділивши  $f_c$  на 360 наступним чином:  $10 \times 6 \times 6$ . Двоквадратурні несучі та двоквадратурні сигнали перемикання можуть бути отримані за допомогою двох інвертованих прямокутних сигналів подвоєної необхідної частоти, ділення обох сигналів на два дає два квадратурні сигнали [3]. Сума вхідного сигналу приймача  $S_0(t)$  дає чотири різні сигнали в 4 квадранті періоду перемикання наступним чином:

$$\begin{aligned} &1 + \alpha \sin(\vartheta) + \alpha \cos(\vartheta); \quad 1 + \alpha \sin(\vartheta) - \alpha \cos(\vartheta); \\ &1 - \alpha \sin(\vartheta) - \alpha \cos(\vartheta); \quad 1 - \alpha \sin(\vartheta) + \alpha \cos(\vartheta). \end{aligned}$$

Вибір аналогових сигналів здійснюється наступним чином. Якщо сигнал дискретизується для кутів з кроком  $2^\circ$ , тоді загальна кількість точок вибірки становитиме 180, це ділиться на 4 квадранти, як 45 точок вибірки в кожному квадранті. Для 180 точок вибірки потрібна 8-бітна адреса.

Сорок п'ять точок кожного квадранта вибираються 6-бітним лічильником, дешифруються і передаються далі по схемі. Лічильник адресує адресу першого молодшого біта EPROM (від  $A_0$  до  $A_5$ ). Різні квадранти вибираються двоквадратурними сигналами перемикання як адресні біти  $A_6$  і  $A_7$ . Зміна фазового зсуву  $\vartheta$  вибирається як 16 значень на 4 біта як  $A_8 - A_{11}$ .

Сигнали  $A_{12}$  і  $A_{13}$  вибирають 4 різні режими як:

- (00,01) задає  $\sin(\Omega t - \vartheta)$  з ROM1 та  $\cos(\Omega t - \vartheta)$  з ROM2;
- (10) задає  $\sin(\vartheta)$  з ROM1 і  $\cos(\vartheta)$  з ROM2;
- (11) задає  $\alpha A P(t) \sin(\vartheta)$  з ROM1 і  $\alpha A P(t - T/4) \cos(\vartheta)$  з ROM2.

АМ-модульований сигнал отримується шляхом перемикання позитивної та негативної огибаючої сигналом несучої, це робиться за адресою старшого біта  $A_{14}$ .

### Висновки

В статті представлено реалізацію для моделювання приймача ADF, який є частиною з аналізом з точки зору навчальних цілей. Модель охоплює: функції системи, основні етапи обробки та необхідні контрольні точки. Змодельовані системи поєднуються з ПК для керування різними режимами роботи і виконують необхідні обчислення для процесу навігації. У подальшому модель може бути розширена, щоб охопити нові модулі для інших навігаційних систем авіоніки. Необхідні спрощення та мінімізація системних функцій і контрольних точок зроблено для усунення надмірності у генерації сигналу.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Skrypnik, Oleg Nicolaevich, and Oleg Nicolaevich Skrypnik. "Elements of the General Radio Navigation Theory." Radio Navigation Systems for Airports and Airways (2019): 1-52.
2. P. Skryja, P. Barcik, Z. Kolka and O. Wilfert. Autoaligning System for Short-Range Free Space Optics Links, &quot; 2022 32nd International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), Kosice, Slovakia, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/RADIOELEKTRONIKA54537.2022.9764918.
3. P. Schoeder, B. Schweizer, A. Grathwohl and C. Waldschmidt, &quot;Multitarget Simulator for Automotive Radar Sensors With Unknown Chirp-Sequence Modulation,&quot; in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 31, no. 9, pp. 1086-1089, Sept. 2021, doi: 10.1109/LMWC.2021.3088882.
4. R. Sabatini et al., "Avionics Systems Panel Research and Innovation Perspectives," in IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 35, no. 12, pp. 58-72, 1 Dec. 2020, doi: 10.1109/MAES.2020.3033475.
5. Wendong, G., Bo, N., Feiyue, M., & Guobin, F. (2021, October). Optimization of Antenna Array for Partial Discharge Positioning in Substation Based on Cramér-Rao Lower Bound. In 2021 10th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE) (pp. 8-11). IEEE.

Received (Надійшла) 21.10.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.11.2023

### Architecture of the software and hardware model of angle measurement system in the automatic radio direction finder

V. Martovytskyi, O. Yankovskyi, A. Kovalenko, O. Sevostianova

**Abstract.** The article is devoted to a detailed consideration of the architecture of the software and hardware model of angle measurement system in the automatic radio direction finder. The article reveals the functionality of antennas, transceiver units, signal processing units and angle determination. Special attention is paid to the interaction of software and hardware to ensure optimal system performance. The architecture of the software and hardware model of angle measurement system in the automatic radio direction finder is a key aspect in the development and effective functioning of the short-range radio engineering systems. This model defines the structure and interaction of the software and hardware used to accurately measure angles when obtaining radio bearing. The article presents an implementation for modeling the ADF receiver, which is part with analysis from the point of view of educational goals. The model covers: system functions, main processing steps and necessary control points. The simulated systems are combined with a personal computer to control various operating modes and perform the necessary calculations for the navigation process. The model can be extended to include new modules for other avionics navigation systems.

**Keywords:** RSNB, radio direction finder, avionics, navigation, angle measurement.

# Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 656.6

doi: 10.26906/SUNZ.2023.4.034

А. А. Замана, І. Л. Гусак

Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЇВ БЕЗПЕЧНОЇ ШВИДКОСТІ СУДЕН ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДЕН ВНУТРІШНІМ ВОДНИМ ТРАНСПОРТОМ

**Анотація.** Метою даної роботи є побудова архітектури системи управління рухом судна на основі модифікації принципів побудови самої моделі системи управління судном з використанням нових підходів до формалізації процесів збору та обробки інформації. Поставлена мета досягається шляхом аналізу основних варіантів побудови моделей руху судна (МРС), розроблення методики її формування на основі збереженої інформації про рух судна, синтезу МРС з використанням апарату нечіткої логіки та оцінки якості їхньої роботи, побудови агентної моделі управління руху судна на основі розробленої МРС. Найсуттєвішим результатом є розробка структури агентної системи обробки вихідних даних від вимірювального комплексу та математичний опис даної системи агентами, об'єктами довкілля та подіями, які в ньому відбуваються. Крім того, елементи системи пов'язані між собою реакцією довкілля на дію або бездіяльність агентів, що розглядаються як закони функціонування системи. Значущість отриманих результатів складається у розробці методики і структури системи формування моделі руху судна, яка відрізняється використанням результатів вимірювань станів судна і умов його плавання протягом регулярних рейсів та формуванням на цій основі бібліотеки. Особливістю одержаних результатів є накопичення в структурованій бібліотеці даних, вимірних після оцінювання їхньої новизни, та їх періодичне використання для уточнення моделей. Запропонована структура бібліотеки моделей і бази вихідних даних, які аналогічні за побудовою, і містять два розділи – станів судна та умов плавання, що безпосередньо впливає на методику вибору необхідної моделі з бібліотеки. Відміна від відомих робіт полягає у структуруванні умов плавання на основі положень теорії нечітких множин, що дозволило обирати моделі, які найбільше підходять до поточної ситуації без використання для їх формування додаткового маневрування. Для реалізації мультиагентних систем, що функціонують у реальному часі, запропоновано розробити модуль прийняття рішення агентом і реалізувати функції цілепокладання під час реалізації прийнятих рішень. Запропоновані підходи дозволяють підвищити якість формального опису розв'язуваних задач, формалізувати процеси збору й обробки інформації про стан судна та умови плавання і реалізувати архітектуру системи керування судном для різних умов.

**Ключові слова:** судно, безпечна швидкість, система управління рухом, система керування судном, формалізація, збір та обробка інформації, модель руху судна, методика, нечітка логіка, теорія нечітких множин, агент, агентна система, мультиагентна система, вимірювальний комплекс, стан судна, умови плавання судна, бібліотека даних, реальний час, прийняття рішень.

### Вступ

Забезпечення безпеки плавання у внутрішніх водах є одним із найактуальніших і найскладніших завдань сучасного судноводіння. Складність завдання зумовлена його багато-факторністю, а актуальність – тяжкими наслідками аварійних випадків. Найнебезпечнішими для плавання вважаються обмежені акваторії річок [1, 2], на які припадає найбільша кількість аварійних випадків, що мали місце. Під час плавання в цих акваторіях керування судном, як правило, здійснюється в ручному режимі, завдяки чому його результати виявляються значною мірою залежними від людини, її кваліфікації, досвіду та інформованості [1].

Одними з найбільш значущих чинників аварійності є наявність помилок в оцінці поточної навігаційної обстановки, відсутності достовірної прогностичної інформації про розвиток процесу та оцінки ступеня небезпеки цього процесу [1, 2]. На жаль, можливості судноводіїв щодо оцінювання ступеня складності та небезпеки поточної ситуації, а особливо прийняття якісних рішень, які забезпечують вихід із небезпечних ситуацій, вельми обмежені [2, 3]. Так, з огляду на те, що людина здатна зберігати у своїй

оперативній пам'яті не більше ніж  $7 \pm 2$  оперативні образи [4], ментальне опрацювання доволі об'ємної вхідної інформації, що відбувається під час плавання, не може бути виконано гарантовано коректно.

Впроваджені наразі на судна електронні картографічні навігаційно-інформаційні системи (ЕК-НІС) [5] істотно розвантажують судноводія від рутинної роботи, пов'язаної з розв'язанням формальних навігаційних завдань, розширюють склад його інформаційної бази, полегшують доступ до потрібної інформації, надають інформацію в зручному для оцінки ситуації вигляді. Усе це сприяє концентрації зусиль судноводіїв безпосередньо на оцінці поточної ситуації та прийнятті рішень з управління судном. Але навіть у цих умовах завдання прийняття рішення судноводієм виявляється доволі складним через низку причин, основними з яких є:

– висока відповідальність за прийняте рішення, зумовлена значними можливими негативними його наслідками;

– необхідність урахування значної кількості чинників (умов плавання, динамічних характеристик судна, характеру виконуваного завдання, рівня підготовки та ступеня злагодженості дії екіпажу, стан

машин і механізмів та ін.), які мають різну природу, і випадковий характер;

- відсутність повної і достовірної інформації, необхідної судноводієві для прийняття рішень;

- різноманіття можливих ситуацій, як штатних, так і позаштатних, що вимагають оперативного прийняття рішення;

- обмежений час на прийняття рішення під час плавання річками, особливо в разі виникнення позаштатних й аварійних ситуацій;

- необхідність наявності досвіду прийняття рішень при виникненні позаштатних ситуацій.

У цих умовах особливої актуальності набуває прогнозна інформація. Вона дає змогу не тільки судити про майбутній стан судна, а й оцінити ступінь його небезпеки, а за наявності відповідної бази знань – дати рекомендації судноводію щодо виходу з небезпечної ситуації.

Однак прогнозування параметрів стану судна, як і вирішення завдань керування його рухом, неможливе без наявності якісної моделі руху судна (МРС) [6], яка б у реальних умовах плавання відображала особливості поведінки конкретно того судна, на якому реалізовано модель. Створенню зазначених моделей присвячено велику кількість робіт [7-17].

Об'єктом дослідження переважної більшості цих робіт є МРС, в основі яких лежать рівняння руху судна. Однак ці моделі мають низку суттєвих недоліків, основними з яких є:

- досить складна структура рівнянь, які навіть наближено описують рух судна, що ускладнює ідентифікацію його параметрів;

- значна залежність коефіцієнтів рівнянь (параметрів майбутньої моделі) від технічних параметрів судна, його поточного стану та умов плавання, що істотно ускладнює вибір найкращих їхніх значень для формування шуканої прогностичної інформації.

Зазначені обставини роблять актуальними вирішення таких основних завдань:

- оцінка можливості використання для формування МРС підходів, заснованих на інтелектуальних інформаційних технологіях;

- розроблення методики формування моделей, що використовують ці підходи, та оцінювання якості їхньої роботи.

**Аналіз літератури.** На сьогоднішній день розроблено велику кількість підходів щодо побудови систем керування судном. Досить очевидно альтернативою традиційному підходу формування МРС можуть слугувати моделі типу "чорний ящик" і "нечіткі" моделі, побудовані з використанням апарату нечіткої логіки [5]. Ефективність використання зазначених моделей для розв'язання цієї задачі практично не досліджено, тоді як їх досить успішно застосовують у багатьох технічних і прогностичних системах [18-24]. Нечіткі системи є одним із бажаних підходів до побудови апроксиматорів безперервних процесів та їхніх похідних [5, 25], не потребують математичного опису об'єкта керування або процесу, досить прості за структурою, тому саме їх було прийнято для подальшого дослідження в роботі. Однак їхнє використання породжує монолітну конструкцію моделі,

яка слабо піддається модифікації та доопрацюванню, що зумовлює вибір агентного підходу до її побудови.

Формування моделі може здійснюватися безпосередньо перед її використанням [7, 13, 14, 26]. Однак під час плавання в обмежених акваторіях це здійснити практично складно внаслідок того, що для ідентифікації параметрів потрібен досить великий обсяг вихідної інформації, який складно сформувати в обмежених часових і просторових рамках. Використання судна на внутрішніх водах, зокрема на р. Дніпро, дає змогу провести попереднє формування необхідної бази даних (БД), використовуючи яку, можна синтезувати оптимальну модель без додаткових вимірювань. Цю базу можна формувати на підставі наявних БД, лоцій, навігаційної та гідрографічної інформації, а також постійного автоматичного моніторингу параметрів руху судна та умов плавання в процесі виконання звичайних рейсів і обробки отриманих даних за спеціально розробленими алгоритмами. Зазначений підхід скоротить час, що витрачається на формування самої моделі, практично до нуля і повністю виключить необхідність виконання додаткових маневрів для збирання даних під час плавання в обмежених акваторіях. Однак цілісної методики, що охоплює і процес формування баз вихідних даних, і синтез моделі, використовуючи ці дані, наразі не існує.

Це визначає необхідність проведення досліджень і дає змогу сформулювати актуальну наукове завдання з розроблення методів і моделей підвищення безпеки руху судна під час плавання у внутрішніх водах на основі прогностичної інформації стану об'єкта управління та зовнішньої обстановки.

**Метою** статті є побудова архітектури системи управління рухом судна на основі модифікації принципів побудови самої моделі системи управління судном з використанням нових підходів до формалізації процесів збору та обробки інформації.

## Основна частина

Вирішення сформульованого завдання з розроблення моделей руху судна та розроблення архітектури системи керування потребують всебічного розгляду та вирішення таких часткових завдань:

- аналіз основних варіантів побудови МРС;

- розроблення методики формування МРС на основі збереженої інформації про рух судна;

- синтез МРС з використанням апарату нечіткої логіки та оцінка якості їхньої роботи;

- побудова агентної моделі управління руху судна на основі розробленої МРС.

У загальному випадку модель керованої динамічної системи повинна з необхідною точністю відтворювати зміну стану цієї системи з плином часу за заданих керуючих впливів у заданих умовах її функціонування. Практична цінність побудови зазначених моделей полягає в тому, що за їхньою допомогою без істотних економічних і часових витрат можна вивчити особливості поведінки системи в різних експлуатаційних умовах, оцінити вплив конструктивних параметрів об'єкта керування, а також керівних дій на характер досліджуваного процесу, синтезувати оптимальні варіанти керування процесом, прогнозувати

розвиток процесу під час його практичної реалізації. Річкові судна є складними і дорогими технічними системами, що функціонують в умовах зовнішнього середовища, що змінюються. Тому багато завдань їхнього проектування, керування рухом, забезпечення безпеки плавання не можуть бути вирішені без попереднього дослідження якості вирішення завдань із використанням моделей їхнього руху.

Залежно від конкретних завдань моделювання до використаної моделі висуваються різні вимоги. Серед цих завдань виділимо випадки, коли:

- модель руху судна має забезпечувати можливість оцінювання впливу очевидних і легко вимірюваних параметрів судна та системи керування на його поведінку,

- модель будується для фіксованих параметрів конкретного судна і вище названа вимога не є обов'язковою.

Для практичної реалізації завдання формування МРС у рамках розглянутого підходу необхідно періодично протягом регулярних рейсів проводити вимірювання поточних станів судна та умов його плавання, представляючи результати цих вимірювань у вигляді структурованої бази вихідних даних, які використовуються для синтезу моделей. Зі свого боку, моделі, синтезовані з використанням цих даних, мають бути представлені у вигляді бібліотеки МРС, з якої обирають модель, що якнайкраще відповідає поточному режиму й умовам плавання. Поряд із цим має проводитися оцінювання якості роботи обраної моделі і за необхідності здійснюватися корекція її параметрів. Усі зазначені завдання можуть бути вирішені системою формування МРС, структура якої наведена на рис. 1.

До складу системи входять:

- вимірювальний комплекс (ВК), що формує параметри вектора стану судна і вектора, який визначає умови плавання;

- модуль вихідних даних;
- формувач структур і параметрів МРС;

- модуль формування поточної моделі руху судна;

- модуль корекції параметрів доступних моделей;

- модуль, що містить модель судна, використовувану в конкретний розглянутий часовий відрізок.

Запропонована структура забезпечує постійне оновлення та поповнення бази вихідних даних, що дозволяє своєчасно коригувати параметри збережених моделей руху судна відповідно до змін динамічних характеристик судна.

Поточний стан судна визначається такими основними параметрами, значення яких використо-

вуються за будь-якого підходу до формування моделі судна:

- $V_x, V_y, \dot{V}_x, \dot{V}_y$  – складові лінійної швидкості та прискорення за осями, пов'язаними із судном;

- $\omega_z, \dot{\omega}_z$  – кутова швидкість і прискорення повороту судна;

- $n$  – число обертів гвинта;

- $\beta$  – кут перекладки керма;

У свою чергу, для характеристики умов плавання використовуються:

- $H$  – глибина під кілем судна;

- $T$  – осадка судна;

- $V_k$  – швидкість уявного вітру;

- $K_{\text{віт}}$  – курсовий кут удаваного вітру;

- $\alpha_{\text{в}}$  – кут хвильового схилу;

- $K_{\text{в}}$  – кут набігу хвилі.

Створену базу вихідних даних структурують відповідно до поточних станів судна й умов плавання (рис. 2). Запропонований підхід може бути реалізовано з використанням агентного підходу. За його допомогою можливо структурувати процес оброблення даних і провести декомпозицію комплексу накопичення та структурування вихідних даних. Усю область  $R$  визначення вектора  $X$  розбивають на кінцеву кількість підобластей  $r_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ),  $r_i \in R$ , кожній з яких відповідає певна структура моделі. Аналізатор режиму руху судна співвідносить поточний

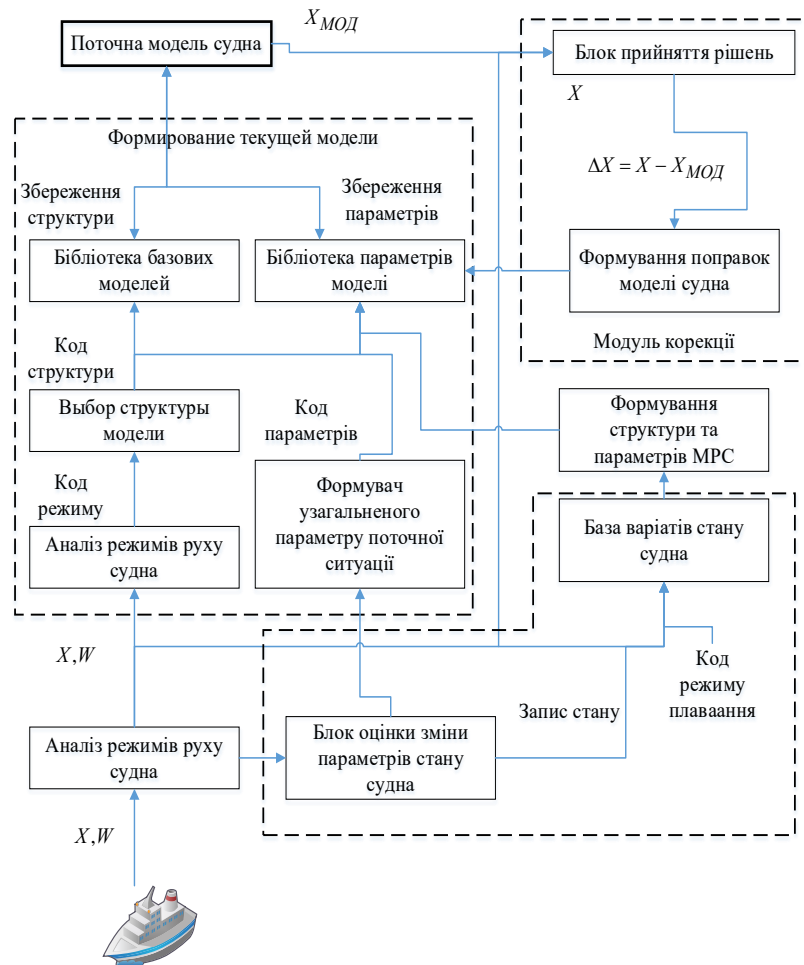


Рис. 1. Структура системи формування моделі руху судна

режим  $X$ , що надходить із вимірювального комплексу, з одним із  $m$  можливих режимів, у межах яких структура моделі вважається незмінною, і вибирає його як кластер для запису поточних умов плавання.

Діапазон поточних умов плавання  $W$  розбивається на кінцеву кількість  $n$  кластерів, усередині яких ступінь впливу умов плавання на рух судна можна вважати постійним. Кількість кластерів залежить від параметрів судна і вимог, що висуваються до якості моделювання. Початкове значення  $n$  може бути визначено для кожного судна на основі експертних даних, а згодом автоматично уточнено за оцінками якості роботи використовуваних моделей. Для кодування кластерів умов плавання з метою відмінності їх один від одного можуть бути використані підходи, засновані на положеннях теорії нечітких множин і теорії розпізнавання. Відповідні приклади наведено нижче.

Таким чином, у результаті формується бібліотека вихідних даних, з якої легко можна вибрати відомості, необхідні як для формування структури МРС для кожного з  $n$  кластерів, так і параметри цієї структури, що відповідають прийнятним умовам плавання.

Реалізація цього підходу передбачає новий підхід до вибору і реалізації архітектури системи управління судном. Найперспективнішим є використання агентного підходу. На рівні прикладної логіки агенти здійснюють операції, безпосередньо пов'язані з вирішенням різних завдань системи керування. Рівень платформи виконання, або проміжний рівень (Middleware), є інтерфейсом між апаратною платформою, який "склеює" розподілені компоненти системи. Рівень фізичної інфраструктури пов'язаний з об'єктами реального світу, такими як вимірювальний комплекс судна. Фізична інфраструктура має реалізовувати взаємодії з об'єктом фізичної реальності, наприклад, таким, як судно.

Мультиагентна система визначається множиною елементів системи і зв'язків між ними. Основними елементами мультиагентної системи є агенти, об'єкти довкілля та події, які в ньому відбуваються. Елементи такої системи пов'язані між собою законами функціонування системи – реакцією довкілля на дію або бездіяльність агентів [8]. У загальному вигляді модель мультиагентної системи  $\Psi$  може бути представлена коротцем

$$\Psi = \langle \Theta, P_{\Psi}, E, \delta_{\Psi}, S_{\Psi}, s_{\Psi_0} \rangle, \quad (1)$$

де  $\Theta$  – множина об'єктів довкілля;  $P_{\Psi}$  – множина параметрів довкілля;  $E$  – множина подій, що можуть відбуватися в середовищі;  $S_{\Psi}$  – множина всіх можливих станів системи;  $s_{\Psi_0}$  – початковий стан системи;  $\delta_{\Psi}$  – функція переходу між станами  $S_{\Psi}$ .

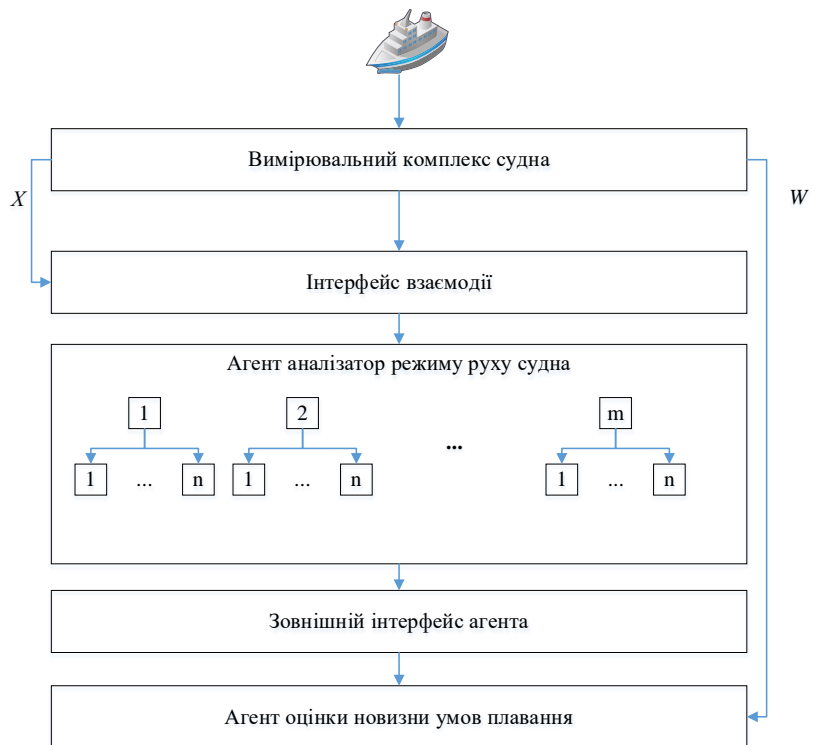


Рис. 2. Структура агентної системи обробки вихідних даних від вимірювального комплексу

Агент може взаємодіяти з іншими агентами та інтерактивними об'єктами, здійснюючи над ними дії. Для кожного інтерактивного об'єкта відомі фізичні аспекти його моделі та поведінкові реакції за різних способів взаємодії. Під час здійснення дій агент може використовувати інструменти – параметри, пов'язані з реальними об'єктами, з якими агент взаємодіє і "знає". Взаємодія відбувається на дистанції, що визначається способом взаємодії – класом дії та використовуваними інструментами. У кожен момент часу агент може здійснювати не більше однієї дії. Тривалість дії також визначається класом дії та інструментами. Послідовність дій, які виконує агент у процесі моделювання, формує поведінку агента, що проявляється у вигляді і як безпосередньо спостережуваних дій, і як зміни прихованого внутрішнього стану – пам'яті. Пропонована структура агента наведена на рис. 3.

Планування переміщень судна та уникнення зіткнень здійснюється системою навігації агента й є важливим елементом ефективного функціонування системи в цілому. Для взаємодії з об'єктами довкілля судно має перебувати в межах певної області простору в околиці цільового об'єкта. Щоб зайняти необхідну позицію, судно має здійснити переміщення в просторі реального світу. Для кожного способу взаємодії може бути визначено своє необхідне взаєморозташування судна і навколишніх об'єктів.

Для визначення бажаної позиції агента в просторі пропонується використовувати абстрактний об'єкт – «ціль навігації». Ціль (мета) навігації завжди асоційована з об'єктом агентної системи, з яким агент має намір взаємодіяти, та описує обмеження, що визначають допустиме й оптимальне взаємне розташування судна й об'єкта.

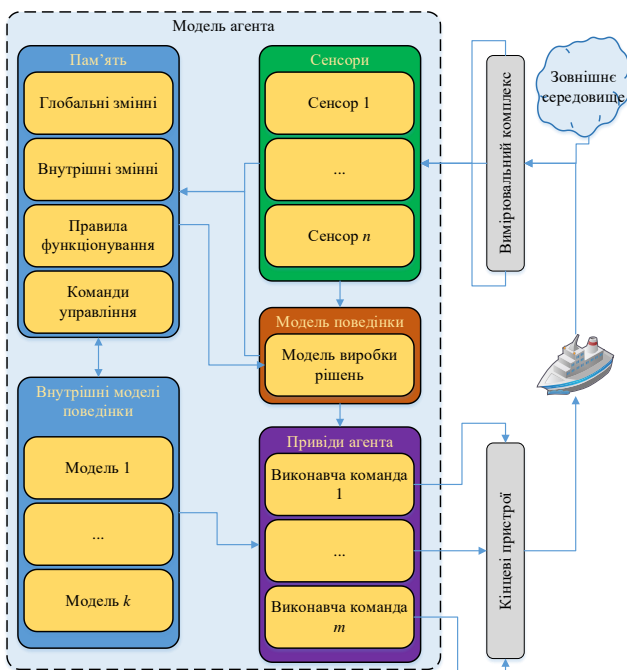


Рис. 3. Пропонована модель агента

Під час побудови маршруту координати цільової точки визначаються не об'єктом, над яким буде виконуватися дія, а ціллю навігації, яка відповідає бажаній дії, як показано на рис. 4.

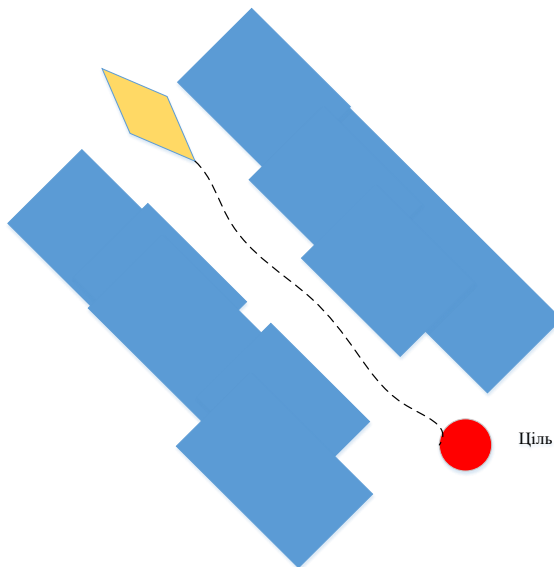


Рис. 4. Внутрішня ціль агента

Ціль навігації  $O_{nav}$  визначає область, в яку має прийти судно, враховані обмеження і швидкість переміщення. Модель цілі навігації може бути представлена короткем:

$$O_{nav} = \langle \theta_{target}, f_{arrival}, f_{position}, m_{movement} \rangle, \quad (2)$$

де  $\theta_{target}$  – цільовий об'єкт навколишнього середовища;  $f_{arrival}: S_{\Theta}^2 \rightarrow [0; 1]$  – функція оцінки близькості до цілі;  $f_{position}: S_{\Theta}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  – функція, що повертає абсолютне значення координат цілі в просторі навколишнього середовища;  $m_{movement}$  – обмеження на переміщення.

Функція оцінки ступеня близькості до цілі повертає дійсне число в діапазоні  $[0; 1]$ . Для будь-якої точки за межами області, визначеної метою навігації,  $f_{arrival} = 0$ ; для точок, усередині оптимальної для взаємодії області –  $f_{arrival} = 1$ , для всіх інших точок значення функції дорівнює нормованій відстані до межі допустимої області.

### Висновки

Розроблено методику і структуру системи формування моделі руху судна, що використовує результати вимірювань станів і умов плавання судна протягом регулярних рейсів, а також методику вибору необхідної моделі з бібліотеки. Виміряні дані після оцінювання їхньої новизни накопичуються в структурованій бібліотеці вихідних даних, звідки їх періодично витягують для уточнення моделей, що використовуються. Структури бібліотеки моделей і бази вихідних даних аналогічні і містять два розділи – станів судна та умов плавання. Структурування умов плавання проводилося з використанням положень теорії нечітких множин. Зазначений підхід дав змогу обирати моделі, які найбільше підходять до поточної ситуації без використання для їх формування додаткового маневрування.

Виявлено проблеми процесу розроблення мультиагентних систем реального часу, розв'язання яких передбачає розроблення модуля прийняття рішення агентом і реалізації функції цілепокладання під час реалізації ухвалених рішень.

Використання цих підходів дозволить підвищити якість розроблення формальних описів розв'язуваних задач, використати різноманітний математичний апарат для формалізації задач збору й обробки інформації про стан судна та умови плавання, а також розробити архітектуру реалізації системи керування судном для різних умов.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Про затвердження Правил судноплавства на внутрішніх водних шляхах України // Наказ міністерства транспорту України від 16.02.2004 р. №91 (зі змінами) // <https://www.google.com/> (Дата звернення 06.10.23).
2. Правила плавання по внутрішнім водним путям України // <https://www.google.com/> (Дата звернення 06.10.23).
3. Alur, R. A theory of timed automata / R. Alur, D. L. Dill // Theoretical Computer Science. — 1994. — Vol. 126, no. 2. — Pp. 183–235.
4. Борсук С.П. Ергономічні основи проактивної кваліметрії закономірностей прояву людського чинника в аеронавігаційних системах : дис. ... кандидата техн. наук 05.01.04 / Борсук Сергій Павлович. Харків, 2019. — 378 с.
5. Вагушенко Л.Л. Підтримка рішень по расхождению с судами / Л.Л. Вагушенко. — Одесса: Феникс, 2010. — 229 с.
6. Тихонов І.В. Методологічні основи поліергатичного забезпечення навігації та управління рухом водних транспортних засобів (цільова технологія безпеки) : дис. ... канд. техн. наук 05.22.13 / Тихонов Ілля Валентинович. Київ, 2018. — 441 с.
7. Alur, R. Timed automata // Proc. 11th International Conference on Computer Aided Verification. — London (UK): Springer-Verlag, 1999. — Pp. 8–22.

8. Andreka, H. Handbook of Philosophical Logic / H. Andreka, I. Nemeti, I. Sain // Handbook of Philosophical Logic / Ed. by D. Gabbay. — Kluwer, 1997.
9. Antoniotti, M. Synthesis and verification of discrete controllers for robotics and manufacturing devices with temporal logic and the Control-D system: Ph.D. thesis / New York University. — New York, NY, USA: New York University, 1995.
10. AUV local path planning based on virtual potential field / D. Fuguang // IEEE International Conference Mechatronics and Automation, 2005. T. 4. — 2005. — C. 1711—1716.
11. Aziz, A. BDD variable ordering for interacting finite state machines // Proc. 31st annual conference on Design automation. — San Diego (USA): ACM Press, 1994. — Pp. 283–288.
12. Bacchus, F. Planning for temporally extended goals / F. Bacchus, F. Kabanza // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. — 1998. — Vol. 22, no. 1-2. — Pp. 5–27.
13. Badler N.I., Reich B.D., Webber B.L. Towards personalities for animated agents with reactive and planning behaviors // Creating Personalities for Synthetic Actors: Towards Autonomous Personality Agents. — Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997. — C. 43—57. — ISBN 978-3- 540-68501-2.
14. Baeten, J. C. M. A brief history of process algebra / J. C. M. Baeten // Theor. Comput. Sci. — 2005. — Vol. 335, no. 2-3. — Pp. 131–146.
15. Baier, C. Approximate symbolic model checking of continuous-time markov chains // Proc. 10th International Conference on Concurrency Theory. — London (UK): Springer-Verlag, 1999. — Pp. 146–161.
16. Beer R.D., Gallagher J.C. Evolving dynamical neural networks for adaptive behavior // Adaptive behavior. — 1992. — T. 1, № 1. — C. 91—122.
17. Bel-Enguix G., Jimenez-Lopez M.D. Agent-environment Interaction in a Multiagent System: A Formal Model // Proceedings of the 9th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation. — London, United Kingdom : ACM, 2007. — C. 2607—2612. — (GECCO '07). — ISBN 978-1- 59593-698-1. 107.
18. Berg J. van den, Lin M.C., Manocha D. Reciprocal Velocity Obstacles for RealTime Multi-Agent Navigation // IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION. — IEEE, 2008. — C. 1928—1935.
19. Bonabeau E., Dorigo M., Theraulaz G. Swarm Intelligence. From Natural to Artificial Systems. — Oxford University Press, 1999. — 322 c. — (Santa Fe Institute Studies on the Sciences of Complexity). — ISBN 0195131584.
20. Bonet, B. Heuristic search planner 2.0 / B. Bonet, H. Geffner // The AI Magazine. — 2001. — Vol. 22, no. 1. — Pp. 77–80.
21. Bonet, B. Planning as heuristic search / B. Bonet, H. Geffner // Artificial Intelligence. — 2001. — Vol. 129, no. 1-2. — Pp. 5–33.
22. Borgo, S. Coalitions in action logic // Proc. Twentieth International Joint Conference on Artificial Intelligence. — Hyderabad (India): 2007. — January. — Pp. 1822–1827.
23. Brand, D. On communicating finite-state machines / D. Brand, P. Zafiropulo // J. ACM. — 1983. — Vol. 30, no. 2. — Pp. 323–342.
24. Bratman, M. E. Intention, plans, and practical reason / M. E. Bratman. — Cambridge, MA: Harvard University Press, 1987.
25. Bryant, R. E. Symbolic boolean manipulation with ordered binary-decision diagrams / R. E. Bryant // ACM Computing Surveys. — 1992. — Vol. 24, no. 3. — Pp. 293–318.
26. Bryant, R. E. Graph-based algorithms for boolean function manipulation / R. E. Bryant // IEEE Transactions on Computers. — 1986. — Vol. C-35, no. 8. — Pp. 677–691.

Received (Надійшла) 23.08.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.10.2023

### Method of determination criteria for safe speed of vessels while navigating the Dnipro river

A. Zamana, I. Husak

**Abstract.** The aim of this paper is to build the architecture of the ship motion control system based on modification of the principles of building the model of the ship motion control system itself using new approaches to formalizing the processes of information collection and processing. This goal is achieved by analyzing the main options for building ship motion models (SMM), developing a methodology for its formation based on stored information about ship motion, synthesizing SMM using fuzzy logic and assessing the quality of their work, and building an agent-based model of ship motion control based on the developed SMM. The most significant result is the development of the structure of the agent system for processing the output data from the measuring complex and the mathematical description of this system by agents, environmental objects and events occurring in it. In addition, the elements of the system are interconnected by the reaction of the environment to the action or inaction of agents, which are considered as the laws of the system's functioning. The significance of the obtained results lies in the development of the methodology and structure of the system for forming a ship motion model, which is distinguished by the use of the results of measurements of the ship's states and its navigation conditions during regular voyages and the formation of a library on this basis. The peculiarity of the obtained results is the accumulation of data measured after the assessment of their novelty in a structured library and their periodic use for model refinement. The proposed structure of the model library and the source data base are similar in structure and contain two sections - ship states and navigation conditions, which directly affects the methodology for selecting the required model from the library. The difference from the known works lies in the structuring of navigation conditions based on the provisions of fuzzy set theory, which made it possible to select models that are most suitable for the current situation without using additional maneuvering to form them. To implement multi-agent systems operating in real time, it is proposed to develop a module for decision-making by an agent and to implement goal-setting functions during the implementation of decisions. The proposed approaches allow improving the quality of the formal description of the tasks to be solved, formalizing the processes of collecting and processing information about the ship's state and navigation conditions, and implementing the architecture of the ship's control system for different conditions.

**Keywords:** vessel, safe speed, motion control system, ship control system, formalisation, data collection and processing, ship motion model, methodology, fuzzy logic, fuzzy set theory, agent, agent system, multi-agent system, measuring complex, ship condition, ship navigation conditions, data library, real time, decision making.

Valery Barsov, Eugene Ovdyyuk

National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE AIR FLOW VELOCITY DETERMINATION METHODS

**Abstract. Study subject.** The article presents the comparative analysis results of air flow speed measuring methods by using various physical principles (methods) of obtaining primary information. **The task** is to perform a comparative analysis of air flow speed measuring methods that based on pressure drop, as well as mechanical, thermoelectric, ultrasonic, laser and vortex methods. **The goal** is to assess the considered methods prospects for aircraft use. **The obtained results:** A comparative analysis of the main methods for airspeed measuring has been performed, and the obtained results have allowed to evaluate advantages and disadvantages of the considered methods. **Conclusions:** The performed comparative analysis results provided the conclusion that search for an optimal method remains actual task. The search of optimal method that will enhance the accuracy of airspeed determination with minimal implementation costs requires further research in this direction.

**Keywords:** aircraft, air speed, air velocity, anemometer, pressure tube, Pitot tube.

### Introduction

Accurate determination of the air flow velocity is a prerequisite both for the safe piloting of the aircraft and for the performance of various information and navigation calculations. Everybody knows, flying an aircraft at a speed below the minimum permissible speed can cause stability and controllability losses. And the speed increase above limits can lead to aircraft destroying. In aircraft control systems there are several speed measuring methods are used depending on the tasks: relative to the air flow (Air Speed) and relative to the earth's surface (Ground Speed). Air pressure measuring methods are implemented to measure Air Speed. Doppler and inertial methods are used and to measure Ground Speed.

Air speed ( $V$ ) is an object speed, such as an aircraft, relative to the air. [1]. The results reliability term in the article is understood as a synonym for the concepts of authenticity, match to the true value.

It should also be noted that the "human factor" plays a significant role in the functioning of the automated aircraft control system, along with the flight

Automatic Control System (ACS), as the most important condition affecting the level of aircraft flight safety. The "human factor" manifests itself in errors, omissions or miscalculations that the pilot makes during the flight. As analysis of commissions conclusions created to investigate air crashes causes shows that one of the reasons for the pilot's erroneous decisions was an incorrect aircraft airspeed measurements results receipt. It was associated with shortcomings in the design of the Pitot tube, which is subject to the environment influence [2].

**The goal** of this article is to perform a comparative analysis of methods for air flow velocity measurements based on pressure drop method, as well as mechanical, thermoelectric, ultrasonic, laser and vortex methods, and to evaluate the perspective of the considered methods to apply on various aircraft.

### Air Velocity Measurement Methods Analysis

There are few methods of air flow measurement. These can be measured by using of direct (mechanical) method or indirect (electrical, sonic or pressure drops, etc.) method (Fig. 1).

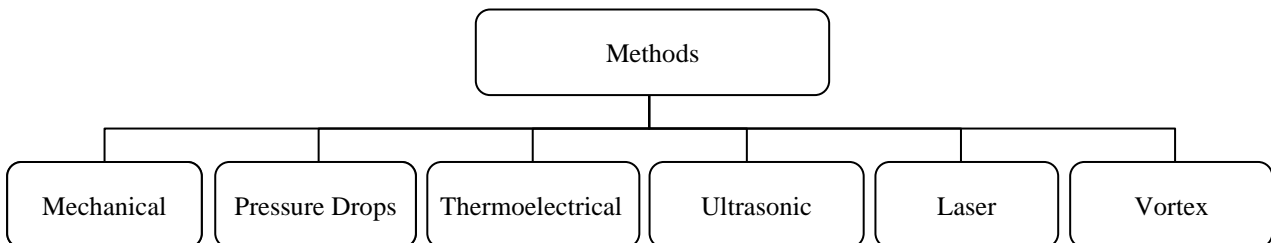


Fig. 1. Methods for Measuring Air Velocity

Induction (electromagnetic) methods based on the principle of measuring flow conductivity will not be considered in the article, as well as float and Coriolis flow meters because air does not have a necessary physical characteristic for measurement.

### Mechanical Methods

A device build by this method measures the speed and direction of the airflow by Rotating Vane or Cap in the airflow.



The rotating velocity in this case is proportional to the air velocity and is calculated as [28]:

$$v = \omega * r,$$

where  $v$  - linear speed (m/s),  $\omega$  - angular speed (radians/s),  $r$  - radius of the rotation (m).

Mechanical anemometers have a rather low accuracy, especially at low wind speeds. In order to analyze the real abilities of this method as a test device, Davis Vane Anemometer was chosen [24]. Fig. 2 shows the measured data scatter approximation.

The calculation of the values plotted on the graph was done with using of the well-known formula [23] for calculating the relative error:

$$K = |V_{True} - V_{Indicated}| / |V_{True}|,$$

where  $V_{Indicated}$  – measured air flow velocity by the tested anemometer (m/s),  $V_{True}$  – true air flow velocity (m/s). The measuring instruments error used to calculate the true flow velocity was not considered, since their values are in all cases commensurate and can be neglected for comparative analysis.

The anemometer used for the experiment gives significant deviations from the true wind speed at speeds below 4 m/s.

There are also more accurate anemometers, such as the Vostas Cup, which allow to measure deviations in the range of values from 3 to 25 m/s with an error of  $\pm 1\%$  (Fig. 3). This sample analysis showed that the average calibration error is 1.2% for the test velocity range from 4 to 26 m/s [25].

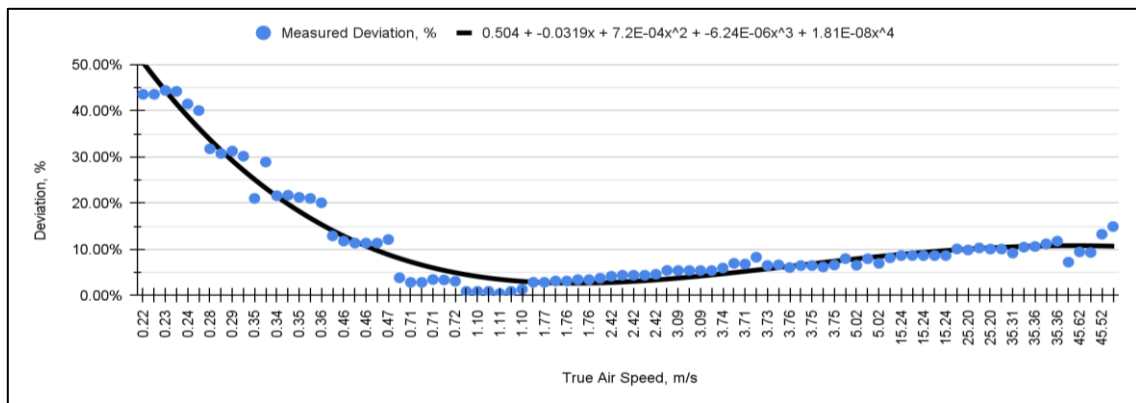


Fig. 2. Deviation graph of the measured from the true speed for Vane Anemometer

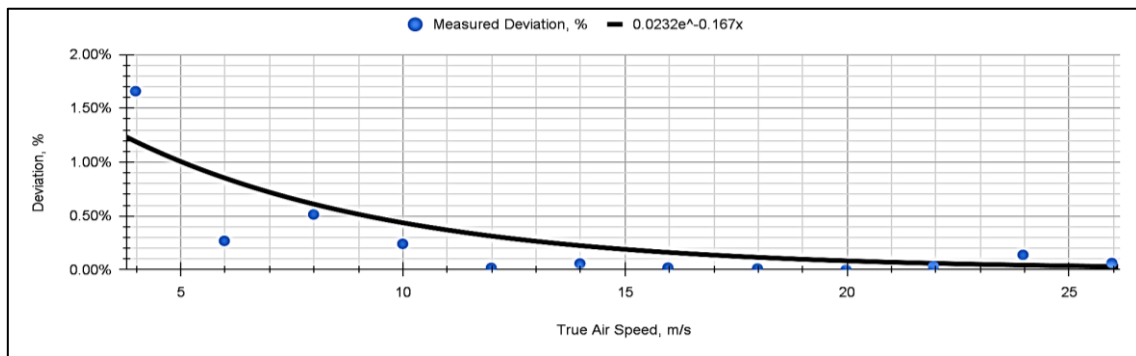


Fig. 3. Deviation graph of the measured from the true speed for Rotating Cup Anemometer

### Methods Based on Pressure Drop Measurement

There are several foremost ways to implement this method for measuring the air flow velocity. However, the calculation of the measured value for all methods is based on Bernoulli's equation (Fig. 4) [3]:

$$v = c [2 g \Delta h]^{1/2},$$

where  $c$  – coefficient that depends on reference liquid and units used or calculated,  $g$  – acceleration of gravity,  $\Delta h = (h_2 - h_1)$  – height difference (fluid column).

The desired value is determined by measuring the pressure delta, at which the air flow velocity is calculated by measuring the pressure difference before and after the tapering through which the air passes. The differential pressure (Fig. 5) depends on the velocity, air density, and cross-sectional area of the channel at the measurement points [3].

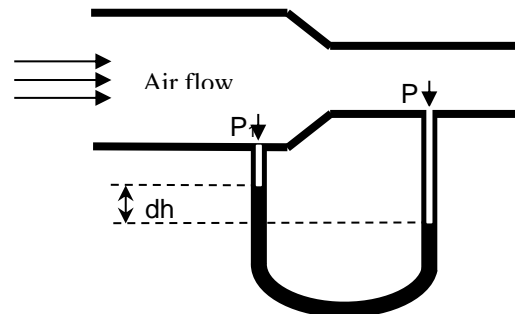


Fig. 4. Schematic of measurement based on pressure drop

The total external static pressure method estimates the air flow mass by measuring the pressure difference between air system inlet and return ducts. Particular methods of this method implementation are based on air pressure tube application, which uses a Pitot tube as a meter.

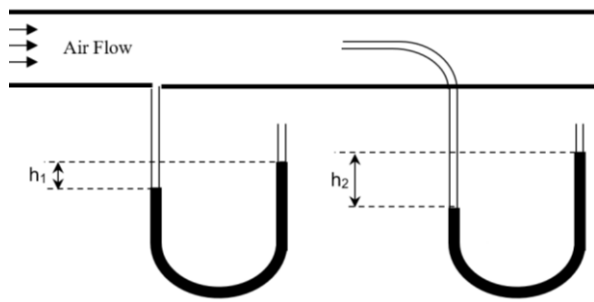


Fig. 5. Prandtl tube schematic

A combined air pressure tube is also used, which includes a static pressure tube and a dynamic pressure tube. Such air pressure tube is an aerodynamic probe in the pneumometric tube form, designed to measure the

total and static pressure of the incoming air flow. The design is based on Prandtl tube (Fig. 5), a combination of a Pitot tube and a pressure tube to measure static flow pressure. Heating systems are added on aircraft to prevent icing [4].

A significant disadvantage of this air pressure tube design is the high probability of blocking the inlet, due to icing or external objects entering in the sensor, which can cause aircraft accidents [4]. The air pressure tube measurement accuracy is shown in Fig. 6.

Measurements of the parameters from the air pressure tube were performed in horizontal flight modes and results were averaged after six flights. The data were taken from three air pressure tube installed on the MI-171A2 as part of the KBO-17-1 complex [26] and were also displayed on graph (Fig. 6) as approximated curve.

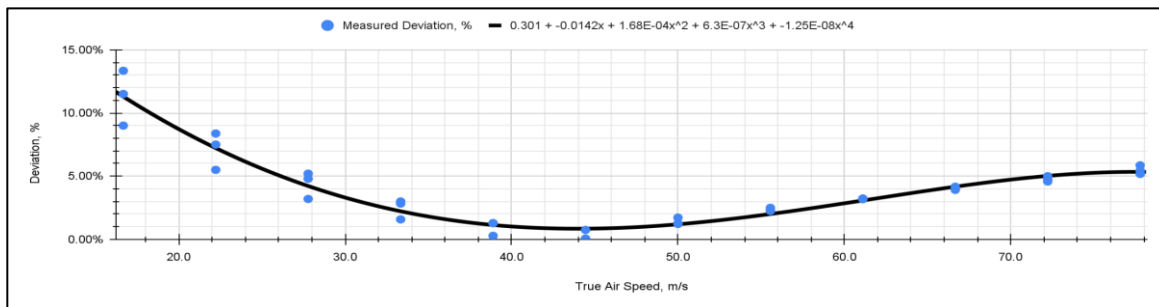


Fig. 6. Deviation graph of the measured from the true velocity for Air Pressure Tube

It can be concluded based on the test results, that the deviation does not exceed  $\pm 5\%$  in the range 30 ...75 m/s (Fig. 6). As the velocity continues to increase, the difference from the true value of the airflow velocity is increasing.

At low speeds, below 25 m/s, the accuracy decreases and the deviation exponentially moves from the true value upwards.

If calibration factors are inputted into the measuring equipment to orient the curve as horizontally as possible, then it is possible to achieve acceptable error results (no more than  $\pm 10\%$ ) for speeds above 25 m/s for taken air pressure tube model.

### Thermoelectric Method

The method implementation is using "hot-wire" anemometer, a device that measures air flow by heating a thin wire placed in an air stream. The wire cools as air passes through it, and the cooling rate is proportional to the air velocity. This method can measure air flow from very low to medium values.

There are also implementations where the heating and measuring elements are separate components of the anemometer, or where an additional "cold" resistor is used to measure ambient air and provides a reference for the "hot" resistor used to measure airflow [5].

Typically, calculations are performed in one of two device operation modes: in constant current mode or in constant temperature mode. Both modes calculations are based on the formula [6,7,40]:

$$v = [(E^2 - E_0^2) / A]^{1/n},$$

where  $E$  – the output voltage of the anemometer,  $E_0$  –

the voltage at zero flow,  $A$ ,  $n$  – constants.

To research the accuracy of this method measurements, two tests were done. The first was at low speeds, which were below 0.3 m/s. The second was at medium speeds, which were higher than 8 m/s.

In the first experiment, three thermoelectric anemometers of the "hot wire" type were used in various designs. These were made from platinum coating tungsten wire with a length of 1.2 mm and a diameter of 5  $\mu\text{m}$ . The tests were carried out using a closed wind tunnel with an operating speed range of 0 m/s to 2 m/s. Anemometers were tested at horizontal airflow ( $0^\circ$ ), downward airflow ( $90^\circ$ ) and upward airflow ( $-90^\circ$ ) at a constant speed. The experiments were carried out at various average speeds ranging from 0.05 to 0.50 m/s [30]. The test results are shown in Fig. 7.

For the next experiment, an open-jet wind tunnel was used with a DANTEC Constant Temperature Anemometer (CTA) unit with a thermofilm probe manufactured by Thermo-Systems Inc. Such a wedge-shaped probe is usually used for both gases and liquids. This type is better when used in air or liquid at very high speeds, when a large load is placed on the sensor [31]. The test was carried out at speeds ranging from 8 ...33 m/s and the results are shown in Fig. 8.

It can be concluded based on the experiments results that thermoelectric methods are not very accurate for air flow speed measuring. Samples, which are assembled in the laboratory, require additional calibration and correction based on environmental conditions. Industrial sensors which are used in piping car systems, can measure air speed in range between 0.1 and 30 m/s with  $\pm 3\%$  accuracy [20].

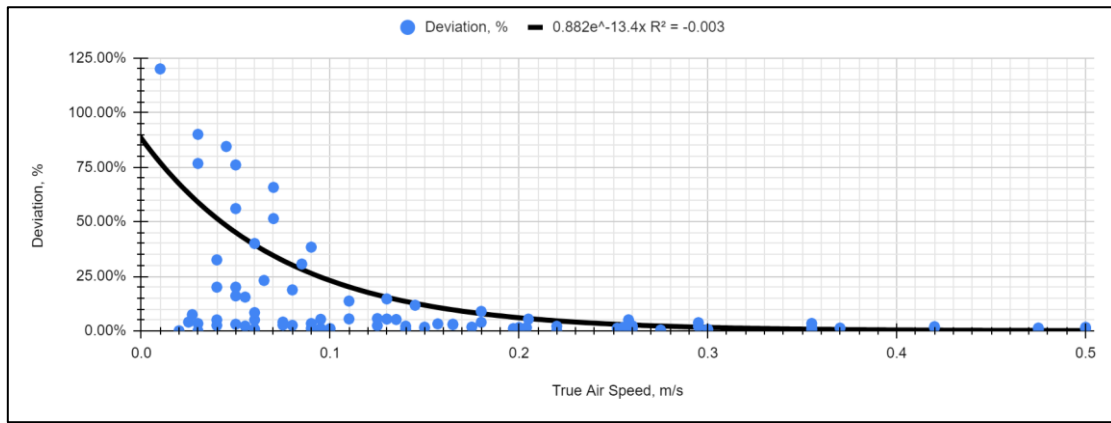


Fig. 7. Deviation graph of the measured from the true velocity (0.05 ... 0.50 m/s) for “Hot Wire” Anemometer

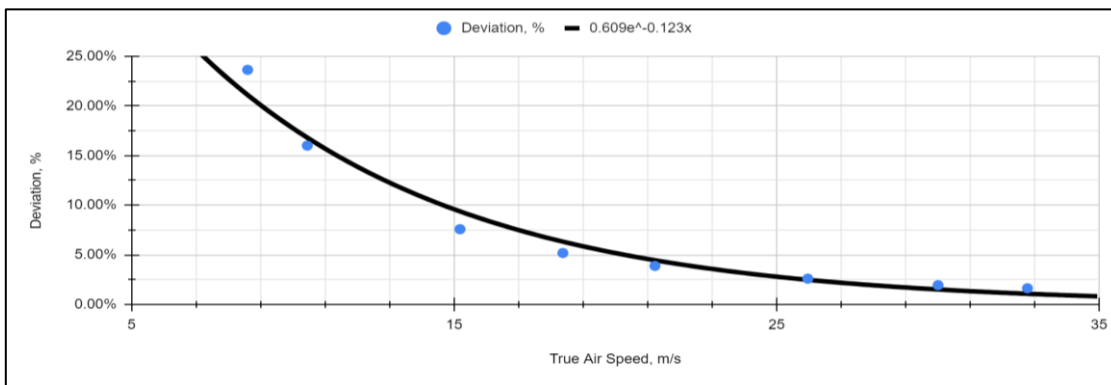


Fig. 8. Deviation graph of the measured from the true velocity (8 ... 33 m/s) for “Hot Wire” Anemometer

**Ultrasonic methods**

**Transit-time Meters.** Such methods are used to measure the difference in the ultrasonic pulses transit time moving in the same flow direction and reverse direction. The transit time difference is proportional to the average flow velocity in the sound waves path.

When air flow speed is zero, the signal transit time from T<sub>1</sub> to T<sub>2</sub> (Fig. 9) is equal to the transit time from T<sub>2</sub> to T<sub>1</sub>. If air flow speed is not zero, the signal increases in the direction of downstream and decreases in the direction of upstream.

The speed of wind speed projection on the axis (V) connecting the two radiators can be determined by the following equation [8]:

$$V = a * (t_{21} - t_{12}) / (2 * t_{12} * t_{21}),$$

where a – distance between T<sub>1</sub> and T<sub>2</sub> (m), t<sub>12</sub> and t<sub>21</sub> – ultrasonic signal transit time from transmitter 1 to 2 and vice versa, respectively.

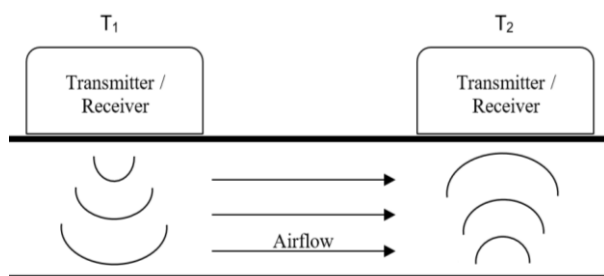


Fig. 9. Signal Transit Time Meter

**Doppler shift flow meters.** These measure the frequency shift of ultrasonic waves (Fig. 10) that reflect off particles or bubbles in the fluid.

The frequency shift is proportional to the relative velocity between the sound source and the reflectors. These flow meters are used for fluids with suspended solids or gas bubbles.

The flow speed (V) is calculated using the equation [8]:

$$V = (f_0 - f_1) * C_t / 2f_0 \cos(a),$$

where C<sub>t</sub> – velocity of sound inside the transducer, f<sub>0</sub> – transmission frequency, f<sub>1</sub> – reflected frequency, a – angle of the transmitter and receiver crystals axis.

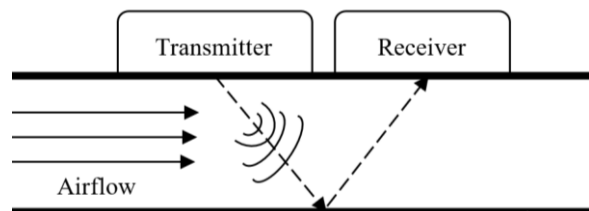


Fig. 10. Doppler shift flow meter

**Open-channel flow meters.** These measure the airflow in an open channel. These flow meters use ultrasonic waves to measure the signal transmission time in both directions from the transmitter to the receiver (Fig. 11) in open channel. The signal transmission time in the forward or in the opposite direction is inversely proportional to the wind speed.

And it can be calculated using the equation [8]:

$$t_{\text{forward}} = d/(c+V) \text{ или } t_{\text{back}} = d/(c-V),$$

where  $d$  – distance between transmitter and receiver (m),  $t$  – signal transmission time of downstream or upstream direction (s),  $c$  – sound speed (m/s),  $V$  – flow speed (m/s).

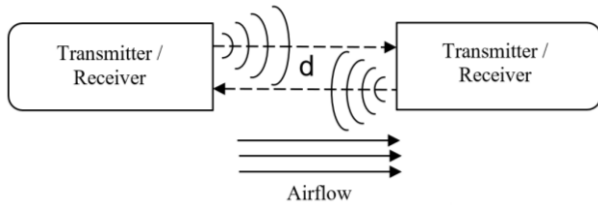


Fig. 11. Open-channel flow meters

### Measurement Accuracy of Ultrasonic Anemometer

Measurement tests were carried out in several metrology laboratories of different countries. The following organizations participated in the testing process: PTB (Germany), LNE-CETIAT (France), VSL (Netherlands), E+E (Austria), NMIJ/AIST (Japan), NIM (China), CMS/ITRI (Chinese Taipei), NIST (USA), INRIM (Italy).

The ultrasonic anemometer is manufactured by SONIC CORPORATION.

The probe has three pairs of ultrasonic transducers and measures a three-dimensional velocity vector derived from the ultrasonic waves transit time between the pairs of transducers [27].

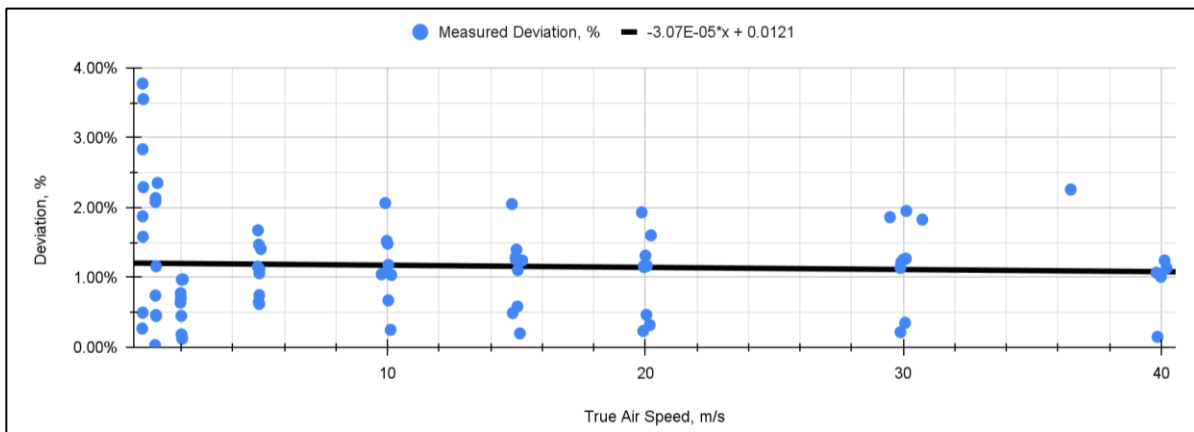


Fig. 12. Deviation graph of the measured from the true velocity for Ultrasonic Anemometer

Devices, which are based on the ultrasonic method, have more accurate characteristics as per test results. The deviation from the true value does not exceed  $\pm 2\%$  (Fig. 12) over the entire measurement range of 0... 40 m/s. Significant advantages over previous measurement methods are acceptable accuracy at air velocities close to zero.

### Laser method

Laser Doppler anemometer uses the Doppler shift in a laser beam to measure the flow velocity. It consists of a laser that splits into two beams (Fig. 13): direct and reflected. The direct flow is directed past the photodetector and moves away from the emitter to the AB direction. The particles in the second  $V$  stream reflect the light towards the receiver, where it is compared to the original beam. The frequency difference between the two beams is proportional to the speed of the particles.

So, the particles of the air flow move through the incident light wave of frequency  $f$  and scatters the light in all directions. The scattered light picked up by the receiver (photodetector) will be shifted for  $f_D$ .

The Doppler shift  $f_D$  depends on the speed  $V$  and direction of the particle motion, the light wavelength  $\lambda$ , and the orientation of the receiver. The orientation of the receiver is defined by the angle of  $\alpha$  between the incident light wave and the photodetector. The direction of motion of the particle motion is defined by the  $\beta$ , the

angle between the velocity vector and the bisector ABC [9] and can be calculated by the equation:

$$f_D = 2V/\lambda * \cos\beta * \sin(\alpha/2).$$

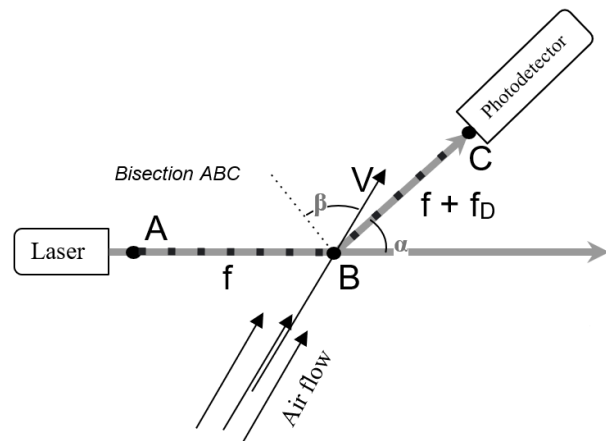


Fig. 13. Laser meter

The laser method has good measurement accuracy characteristics. The tests were carried out by nine different laboratories, as in the previous tests for the ultrasound anemometer. The laser Doppler anemometer system, which is used for the research, was carried out by ILA GmbH. Measurements were performed for the speed range from 0.5 m/s to 40 m/s [27].

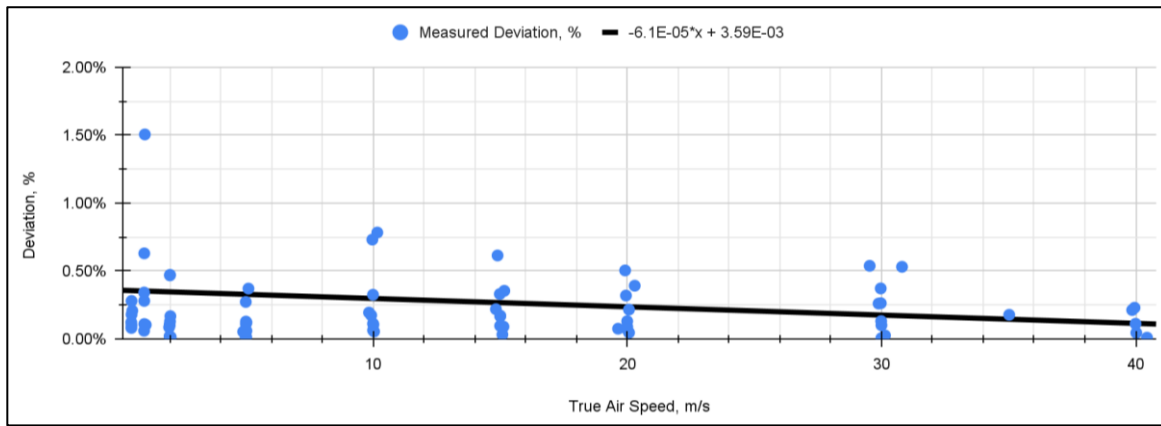


Fig. 14. Deviation graph of the measured from the true velocity for Laser Doppler Anemometer

The laser Doppler anemometer showed better characteristics with fewer results error. The error was ±1% (Fig. 14).

**Vortex method**

In the right flow conditions, the flow streamline around the researched body creates a regular pattern of alternating vortices, known as the Kármán vortex street (Fig. 15).

These vortices create a force acting on the body perpendicular to the flow [32, 33].

The vortex street generating velocity depends on the Reynolds number (Re). Reynolds proved that the flow becomes turbulent when the Re number is 2000-3000, and the flow becomes fully laminar when the Re is less than a few hundred. It can be calculated using the equation [34, 35]:

$$Re = (V*d)/\nu,$$

where V – incoming flow velocity, d – the characteristic size of the streamlined body (diameter for a round body), ν – kinematic viscosity.

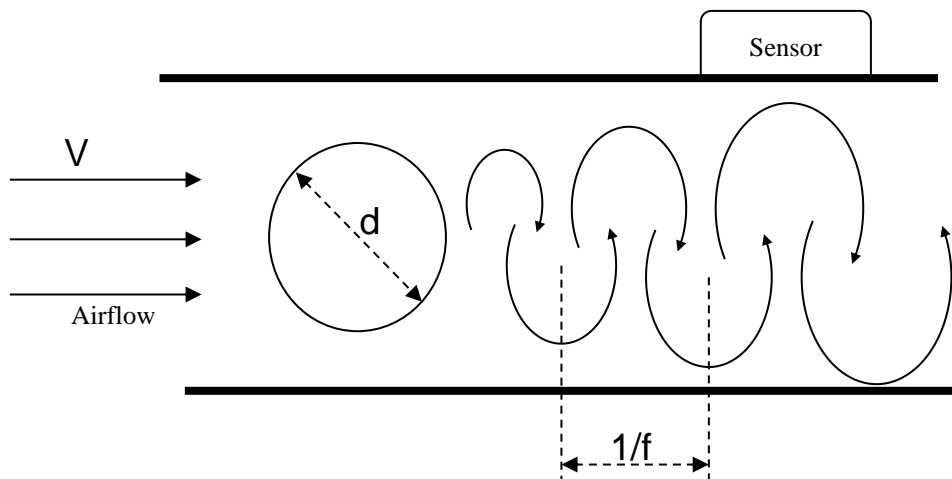


Fig. 15. Generating of Kármán vortices

The kinematic viscosity of air at a temperature of 15 °C is 1.82\*10<sup>-5</sup>. [36]. Vortices will form within 10..100 m/s for 5 mm body diameter, and for 20 mm diameter – in range of 3..11 m/s.

A Kármán street is generating during the transition

from laminar to turbulent flow in a limited range of speeds, and this range is highly dependent on the size of the streamlined body. Thus, this method has a narrow range of measurements with a fixed geometry of the streamlined body.

**Comparative analysis of methods (Table 1)**

Table 1 — Advantages and disadvantages of air speed measuring methods

Methods	Advantages	Disadvantages	Application specifics
Mechanical / Rota-ting Vane and Cap Anemometers	Simple and robust; Insensitive to flow direction;	A limited range of velocities; Can be affected by turbulence and vibration; Need regular calibration and maintenance; Can cause blockage and interference in the flow; Inert;	Rotating vane and cap anemometers are mostly used at airports, testing aerodynamic performance of aircrafts, monitoring air quality and ventilation systems.

Закінчення табл. 1

Pressure drop / Pitot Tube [29]	Simple and inexpensive; Have low pressure loss; Can also measure high velocities; Insensitive to flow direction;	Sensitive to foreign material (ice, dust, insects) that cause blocked pitot tube; Turbulence, vibration, and alignment errors; Low accuracy and rangeability; Need regular calibration and maintenance; Can cause blockage and interference in the flow if not properly installed; Low sensitivity at low speeds;	Are used on airplane, but has high risks with blocked Pitot tube (see Note #1)
Thermoelctric / Hot Wire [10]	Very small; Cause minimal disturbance to the fluid flow; Have high spatial resolution and frequency response, which means they can capture rapid changes in velocity and turbulence; Provide fast and accurate results;	Very delicate and can break easily if exposed to high temperatures or pressures. Need frequent calibration and correction for factors such as ambient temperature, humidity, wire contamination, etc.; Sensitive to electromagnetic interference and vibration; Hight current consumption;	Mainly used in modern household appliances; No application use on aircraft;
Ultrasonic	No moving parts, which reduces maintenance and wear and tear; Fast response time and high accuracy, which makes them suitable for turbulence measurements; Can operate in a wide range of environmental conditions, such as rain, snow, fog, dust, etc.;	Expensive and complex method; Sensitive to temperature variations and acoustic noise; Shadowing effects when the wind direction is aligned with one of the transducer pairs, which reduces the signal strength and accuracy; Require complex data processing;	Their accuracy and responsiveness make them suitable for turbulence measurements, as well as for measuring both horizontal and vertical wind components. They are used at weather stations located in difficult climatic conditions;
Laser [11]	Non-intrusive and do not disturb the flow during measurement; Not require a calibration; High accuracy; Can measure velocity in 3D; Can measure low and high speeds of semi-transparent substances; Can measure velocity and turbulence distribution in both free flows and internal flows;	Require transparent channels and particles in the fluid to scatter the laser light; Sensitive to optical alignment, vibration, and ambient light; Expensive and complex to operate compared to other types of anemometers;	Used in high-tech systems, such as jet engines or medical equipment, where high accuracy and reliability are required;
Vortex / Karman Street effect [38]	Easy installation maintenance and repair; No moving parts; Wide range of speed operation; Low power consumption; High accuracy;	High sensitivity to vibrations; Sensitivity to inhomogeneity of flow; High-speed shocks cause the vortex to oscillate; Does not work in turbulent flow; Influence on the measured flow dynamic; Narrow speed range without changing the body geometry and insensitivity at low flow speeds;	Used to measure the flow of air and liquids in closed systems (piping) for Mass Air Flow (MAF) measurement;

Note #1: All risks related to disadvantages can be mitigated by strict maintenance instructions. But the problems with blocked pitot tube effect is still huge, because:

- A blocked pitot tube can cause inaccurate or erroneous airspeed readings, which can lead to loss of control or stall of the aircraft [2, 12].
- A blocked pitot tube can be caused by insects, water, ice, tape, or other foreign objects [2, 12,13].
- A blocked pitot tube can be difficult to detect and diagnose during flight, especially in instrument meteorological conditions (IMC) [12].

- A blocked pitot tube can affect other instruments that rely on airspeed data, such as autopilot, flight management system (FMS), or stall warning system [2, 12,13].

### Comparison of technical capabilities

By doing this task, anemometers on the market and their characteristics were analyzed. It was analyzed a possible measurement limits, measurement accuracy and resolution of the sensors, which are used in the devices. The summary table shows the parameters for each type of measuring instrument (Table 2).

Table 2 – Technical capabilities comparison of air flow speed measures methods

Type of anemometer	Measurement limits and accuracy
Mechanical / Rotating Vane	0.3 - 30 m/s $\pm 1\%$ [14]
Mechanical / Rotating Cup	0.5 - 30 m/s $\pm 5\%$ [15]
Pressure drop / Pitot Tube / Pressure tube	0 - 500 kPa $\pm 0.3\%$ [26] at 100 m/s speed, accuracy is $\pm 3\%$ ; at 200 m/s speed, accuracy is $\pm 10\%$
Thermoelectric / Hot Wire	0 - 230 m/s $\pm 3\%$ [20,38]
Ultrasonic / Doppler shift effect	0 - 65 m/s $\pm 2\%$ [17,18, 19]
Ultrasonic / Transit-time meters	0 - 10 m/s $\pm 1\%$ [21, 22]
Laser / Doppler shift effect	0 - 300 m/s $\pm 0.1\%$ [16]
Vortex / Karman Street effect	$\pm 1.5\%$ ; measurement range 1:10

### Summary

The mechanical method is completely unsuitable for aircraft use due to its capabilities and design features.

The fragile construction and the exactingness for setting up and calibrating of the thermoelectric method based on "hot wire" also causes doubts if using at aircraft. But it does not exclude the possibility of using this method to measure the air flow at high aircraft speeds.

As described above, the Pitot tube use can lead a certain hazard when operating an aircraft in adverse environmental conditions. Measuring devices based on this method are quite bulky and require high attention during operation, that makes them ineffective for a small aircraft on board use.

The laser method based on the Doppler effect is highly accurate. A feature of the laser meter is that it cannot be used in a transparent environment where the beam is not scattered by the flow.

Vortex sensors have a number of advantages for air flow speed measuring. But a significant disadvantage

of this method is the fact that the Kármán effect occurs during transients in a narrow speed range, which is far from the wide aircraft operation range. An extension of the measurement range is potentially possible when multiple meters are used.

Taking into account the advantages, disadvantages and features of ultrasound methods based on the Doppler effect, it is possible to use them on board aircraft at low and ultra-low speeds. It is also possible to use the ultrasonic method at medium speeds. The main advantage of using this method is that there are no parts that affect the airflow. Therefore, it doesn't cause icing of devices that implement these methods.

Thus, the research for the optimal method, which can increase the reliability of determining the air flow velocity, remains a crucial task that requires additional research in this area. For example, studies [27] have shown that the ultrasonic method use on board an aircraft can increase the measurement accuracy from  $\pm 10\%$  to  $\pm 4\%$  at speeds of 0.6 M m/s, in comparison with a pitot tube use.

### REFERENCES

- Livit. n.d. "Flight speed - Air and ground speed - Aircraft - Aviation modeling and piloting." Aircrafts. Accessed June 24, 2023. URL: <https://livit.ru/plane-driving/navigating-elements-flight-calculation/368>
- Wikipedia.org. 2005. "Pitot-static system." Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Pitot-static\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Pitot-static_system).
- Engineering ToolBox. 2003. "Pitot Tubes." The Engineering ToolBox. URL: [https://www.engineeringtoolbox.com/pitot-tubes-d\\_612.html](https://www.engineeringtoolbox.com/pitot-tubes-d_612.html).
- Wikipedia.org. 2018. "Air pressure tube." Wikipedia. <https://ru.wikipedia.org/wiki>
- Wikipedia.org. 2018. "Mass flow sensor." Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Mass\\_flow\\_sensor](https://en.wikipedia.org/wiki/Mass_flow_sensor).
- Circuit Globe. 2019. "What is Hot Wire Anemometer? - Definition & Construction." Circuit Globe. URL: <https://circuitglobe.com/hot-wire-anemometer.html>.
- Electrical Workbook. 2021. "What is Hot Wire Anemometer? Working Principle, Construction & Applications." ElectricalWorkbook. URL: <https://electricalworkbook.com/hot-wire-anemometer>
- Omega Engineering, Inc. n.d. "Doppler Meters Vs Transit Time Ultrasonic Flow Meters." Omega Engineering. Accessed June 17, 2023. <https://www.omega.com/en-us/resources/dif-between-doppler-transit-time-ultrasonic-flow-meters>.
- Durst, F. A. Melling, and J. Whitelaw. 1981. "Principles and Practices of Laser Doppler Anemometry." Academic Press, no. web.mit.edu, 1-4. [https://web.mit.edu/fluids-modules/www/exper\\_techniques/LDA.text.pdf](https://web.mit.edu/fluids-modules/www/exper_techniques/LDA.text.pdf).
- Industrial Physics. n.d. "Hot Wire Anemometers – Everything You Need to Know." Industrial Physics. Accessed June 17, 2023. <https://industrialphysics.com/knowledgebase/articles/hot-wire-anemometers-everything-you-need-to-know/>.
- Electrical Workbook. 2022. "What is Laser Doppler Anemometer? Working Principle, Construction, Diagram & Applications." ElectricalWorkbook. <https://electricalworkbook.com/laser-doppler-anemometer/>.
- Simon, Jeff. 2019. "AIRCRAFT MAINTENANCE: PITOT-STATIC SYSTEM FAILURES." AOPA. URL: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2019/april/10/pitot-static-system-failures>.
- Newman, Richard. 2020. "Pitot-Static Blockages." Aviation Safety Magazine, (October). URL: <https://www.aviationsafetymagazine.com/avionics/pitot-static-blockages/>.
- Goodfellow, Howard D., and Yi Wang, eds. 2021. Industrial Ventilation Design Guidebook: Volume 2: Engineering Design and Applications. Vol. 2. p.213: Academic press. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816673-4.00004-3>.
- Ramos-Cenzano, Alvaro, Mikel Oeta-Gutiérrez, and Santiago Pindado. 2019. Cup anemometer measurement errors due to problems in the output signal generator system. Flow Measurement and Instrumentation. Vol. 69. URL: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101621>.

16. Measurement Science Enterprise, Inc. | Pasadena, CA | 16. Measurement Science Enterprise, Inc. n.d. "miniLDV." Measurement Science Enterprise, Inc. | Pasadena, CA | Measurement Science Enterprise, Inc. Accessed June 13, 2023. URL: <https://measurementsci.com/products/minildv/>.
17. Deissinger, Robin. n.d. "CSAT3B: 3-D Sonic Anemometer with Integrated Electronics." Campbell Scientific. Accessed June 13, 2023. URL: <https://www.campbellsci.com/csats3b>.
18. Observator. n.d. "WindMaster Anemometers." Observator Instruments. Accessed June 13, 2023. URL: <https://observator.com/products/windmaster-anemometers/>.
19. METER Group. n.d. "ATMOS 22 | Sonic Anemometer | METER Environment." METER Group. Accessed June 13, 2023. URL: <https://www.metergroup.com/en/meter-environment/products/atmos-22-ultrasonic-anemometer>.
20. TES Electrical Electronic Corp. n.d. "Hot-Wire Anemometer TES-1340." Product Detail. Accessed June 13, 2023. URL: [https://www.tes.com.tw/en/product\\_detail.asp?seq=309](https://www.tes.com.tw/en/product_detail.asp?seq=309).
21. Kaifeng Instrument Co., Ltd. n.d. "Wall-mounted ultrasonic water flow meter." Kaifeng Instrument Co., Ltd. Accessed June 13, 2023. URL: <https://www.kyflowmeter.com/product/detail/pro022.html>.
22. SONOTEC. n.d. "Accuracy SONOFLOW CO.55." SONOTEC. Accessed June 13, 2023. URL: [https://www.sonotec.de/fileadmin/user\\_upload/business\\_units](https://www.sonotec.de/fileadmin/user_upload/business_units)
23. Njeri, Rosemary. n.d. "How to Calculate Accuracy." How To Calculate. Accessed June 29, 2023. URL: <https://www.learn2calculate.com/how-to-calculate-accuracy/>.
24. Purtell, L. P. 1978. "Low Velocity Performance of a High Speed Vane Anemometer," Task Report. Washington, D.C.: National Bureau of Standards. URL: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB>
25. Coquilla, Rachael C., John Obermeier, and Bruce R. White. 2007. "Calibration Procedures and Uncertainty in Wind Power Anemometers." www.multi-science.co.uk. URL: <https://www.researchgate.net/publication/229043614>
26. Sorokin, Mikhail Y. 2017. Development and research of air pressure tubes for helicopter avionics systems. pp.133-134: ULSTU. URL: <http://asudiss.ulstu.ru/wp-content/uploads/212/Diser28.pdf>.
27. Müller, Harald, and Isabelle Caré. 2017. "Final Report on CCM.FF-K3.2011," CIPM Key Comparison of Air Speed, 0.5 m/s to 40 m/s. URL: [https://ila-rnd.com/wp-content/uploads/2019/05/Lit\\_CCM.FF-K3.2011.pdf](https://ila-rnd.com/wp-content/uploads/2019/05/Lit_CCM.FF-K3.2011.pdf).
28. Lee, Johnson, and Lana Bandoim. 2020. "How to Convert RPM to Linear Speed." Sciencing. URL: <https://sciencing.com/convert-rpm-linear-speed-8232280.html>.
29. Pilot Institute. 2022. "The Pitot-Static System: How It Works." URL: Pilot Institute. <https://pilotinstitute.com/pitot-static-system/>.
30. Melikov, Arsen K., Zbigniew Popiolek, and Finn E. Jørgensen. 1997. "Impact of Natural Convection on the Accuracy of Low-Velocity Measurements by Thermal Anemometers with Omnidirectional Sensor." AIVC. URL: [https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase\\_11069.pdf](https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_11069.pdf).
31. Simpson, Roger L. n.d. "HOT-WIRE AND HOT-FILM ANEMOMETRY." AOE Dept., Virginia Tech. Accessed July 3, 2023. URL: <https://archive.aoe.vt.edu/simpson/aoe4154/hotwirelab.pdf>.
32. Cooper, J. E. 2001. "Encyclopedia of Vibration." Edited by S. Braun. In AEROELASTIC RESPONSE, Pages 87-97. N.p.: Elsevier. URL: <https://doi.org/10.1006/rwvb.2001.0125>.
33. Rzasca, Mariusz R., and Beata Czaplina-Nielacna. 2021. "Analysis of the Influence of the Vortex Shedder Shape on the Metrological Properties of the Vortex Flow Meter." In Sensors (Basel), 21(14):4697. DOI: 10.3390/s21144697.
34. Airfoil Tools. 2023. "Reynolds number calculator." Airfoil Tools. URL: <http://airfoiltools.com/calculator/reynoldsnumber>.
35. Nauka.Club. 2019. "Reynolds number - a formula for determining what characterizes modes." URL: <https://nauka.club/fizika/chislo-reynoldsa.html>.
36. Engineers Edge. n.d. "Viscosity of Air, Dynamic and Kinematic." Engineers Edge. Accessed July 17, 2023. URL: [https://www.engineersedge.com/physics/viscosity\\_of\\_air\\_dynamic\\_and\\_kinematic\\_14483.htm](https://www.engineersedge.com/physics/viscosity_of_air_dynamic_and_kinematic_14483.htm).
37. Wikipedia. 2023. "Strouhal number." URL: Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Strouhal\\_number](https://en.wikipedia.org/wiki/Strouhal_number).
38. Silver Automation Instruments. 2023. "Advantages and disadvantages of vortex flowmeter - SILVER AUTOMATION INSTRUMENTS LTD." Technical Reference. URL: <https://www.silverinstruments.com/blog/advantages-and-disadvantages-of-vortex-flowmeter.html>.
39. Sino-Inst. 2021. "Karman vortex air flow sensor VS Mass air flow sensor." Drurylandetheatre. URL: <https://www.drurylandetheatre.com/karman-vortex-air-flow-sensor-vs-mass/>.
40. Advanced Thermal Solutions Inc. 2007. "Understanding Hot Wire Anemometry." ATS Qpedia, (December), 13-15. URL: [https://www.mouser.com/catalog/additional/ATS\\_Qpedia\\_Dec07\\_Understanding%20hot%20wire%20anemometry9.pdf](https://www.mouser.com/catalog/additional/ATS_Qpedia_Dec07_Understanding%20hot%20wire%20anemometry9.pdf).

Received (Надійшла) 30.08.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 08.11.2023

### Порівняльний аналіз методів, що використовуються для визначення швидкості повітряного потоку

В. І. Барсов, Є. М. Овдіюк

**Анотація.** Об'єкт дослідження. У статті представлено результати порівняльного аналізу методів визначення швидкості повітряного потоку з використанням різних фізичних принципів отримання первинної інформації. Метою даної статті є проведення порівняльного аналізу методів визначення швидкості повітряного потоку на основі перепаду тиску, а також механічних, термоелектричних, ультразвукових, лазерних і вихрових методів, та оцінка перспективності розглянутих методів застосування на різних літальних апаратах. **Результати.** Проведено порівняльний аналіз основних методів, що використовуються для вимірювання швидкості повітряного потоку, отримані результати дозволили оцінити переваги та недоліки розглянутих методів. **Висновки.** Результати порівняльного аналізу дозволяють зробити висновок, що пошук оптимального методу, який підвищить достовірність визначення швидкості повітряного потоку при мінімальних витратах на його реалізацію, залишається актуальним завданням, що потребує додаткових досліджень у цьому напрямку.

**Keywords:** літак, швидкість повітря, анемометр, приймач тиску повітря, трубка Піто.



Б. Р. Боряк, О. Г. Дрючко, Д. О. Ненич, О. В. Сухоребрій

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

## АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ЛІНІЙНОЇ РЕГУЛЯЦІЇ КЕРОВАНОЇ ВЕЛИЧИНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПІД-РЕГУЛЯТОРА

**Анотація.** В статті запропоновано модель системи керування нагрівача для забезпечення лінійної зміни температури. Для верифікації працездатності системи було приведено експеримент, що передбачав зміну бажаного значення керованої величини за лінійним законом. З метою апроксимації проведення експерименту виконавчий механізм системи було замінено світлодіодом, а вимірювальний елемент фоторезистором. Система реалізована із застосуванням апаратно-обчислювальної платформи Arduino. Дана система дозволяє комбінувати можливості PID-регулятора та зміну бажаного значення регульованої величини в процесі роботи системи. У дослідженні наведені електрична схема, опис програмної реалізації системи керування та результати проведення експерименту.

**Ключові слова:** лінійна регуляція, PID-регулятор, Arduino, замкнена система керування.

### Постановка проблеми

Метою нашої роботи було розроблення комплексу багатопільового програмного формувача лінійного закону зміни температури у робочій зоні легкокорозбінного касетного нагрівача, з можливістю візуального спостереження за зразком, й відтворенням умов і режиму дослідження, з високою надійністю та вдалим метрологічними характеристиками для оснащення лабораторних, наукових і виробничих термоаналітичних комплексів з вивчення температурної поведінки і встановлення функціональних залежностей параметрів досліджуваних об'єктів [1].

Багатопільовий термоаналітичний комплекс призначений для ідентифікації речовин за температурами фазових перетворень (плавлення, кипіння, кристалізації, поліморфних переходів), термічного розкладання; вивчення природи і температурних меж протікання низки теплових ефектів – ступінчастих; близько розташованим за температурним значенням; таких, які накладаються (зумовлені зміною просторової модифікації, дегідратації, розкладання та ін.); функціональних залежностей фізичних властивостей речовин; якісного, а в деяких випадках і кількісного аналізу механічних сумішей речовин; вимірювання температур фазових переходів індивідуальних речовин і систем, побудови на їх основі діаграм стану. Вітчизняна промисловість подібних комплексів не виготовляє. Залежно від цілей втілюваних завдань спосіб його технічної реалізації може бути використаний самостійно в локальних системах чи у комплексі засобів під час проведення термоаналітичних досліджень. Його робочий температурний інтервал визначається областю значень використання хромель-алюмелевих (ХА) перетворювачів, до 1300 С<sup>0</sup>.

### Дослідження шляхів вирішення задачі

На даному етапі дослідження і розробки вище вказаної системи керування було вирішено провести дослід, замінивши вимірювальний елемент на фоторезистор, а виконавчий пристрій на світлодіод (для системи нагріву ми вбачаємо використання серводвигуна, що приєднується до потенціометра, який виконує роль пристрою, що задає бажане значення темпе-

ратури нагріву). Це дозволило мінімізувати витрати ресурсів, хоча і динаміка процесу нагріву суттєво відрізняється від запропонованої модифікації.

Відповідно до технічного завдання проєкту необхідно забезпечити можливість змінювати лінійно регульовану величину. У ролі закону регулювання було розглянуто можливість використання PID-регулятора, який є одним із найпоширеніших автоматичних регуляторів. Існують і інші регулятори, що перевершують ПІД-регулятор по адаптивності до керованої системи і стабільності, наприклад, лінійно квадратичний, але синтезувати такий регулятор складно. В літературі, та інформаційних ресурсах мережі internet [2– 4] наведено регулювання, що передбачає встановлення усталеної величини, тобто «setpoint» регулятора константний. У даному проєкті було запропоновано поєднання використання PID-регулятора та лінійного закону зміни регульованої величини.

Для експерименту було використано елементи апаратно-обчислювальної платформи Arduino, і пристрої, сумісні з платою керування Arduino UNO, яка виконувала роль пристрою керування.

### Програмна реалізація системи керування

Електрична схема підключення елементів системи, яка використовувалась у досліді, наведена на рис. 1. Система складається із таких елементів:

- Arduino uno r3;
- фоторезистор r2 (gl5528);
- світлодіод d1 (білий);
- резистор r1 = 220 ом (обмеження струму на світлодіоді);
- резистор r3 10 ком (для обмеження струму та формування потрібної напруги).

Розглянемо структурні елементи програми, що забезпечують роботу системи керування.

У програмній реалізації системи керування було використано бібліотеку PID\_v1, розроблену Бреттом Борегардом [5], для створення об'єкту PID-регулятора. Підключення бібліотеки, а також визначення змінних, які використовуються для збереження даних про бажане значення (Setpoint), виміряне значення регульованої величини (Input), сигналу керування (Output), а також коефіцієнтів PID-регулятора, наведені у наступній частині коду програми:

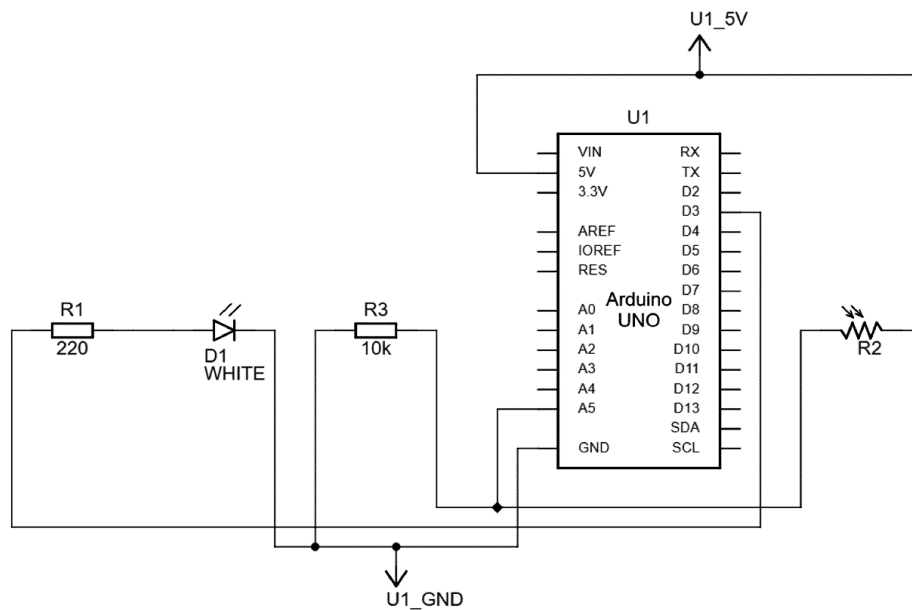


Рис. 1. Схема системи, що використовувалась в експерименті

```
#include<PID_v1.h>
double Setpoint;
double Input;
double Output;
double Kp = 0, Ki = 10, Kd = 0;
```

Програмна реалізація створення об'єкту PID-регулятор, запропонована Бреттом Борегардом, передбачає використання об'єкто-орієнтованої парадигми програмування і реалізується наступним чином:

```
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
```

У функції `setup`, що використовується для встановлення початкових налаштувань, відбувається ініціалізація передачі даних для відслідковування процесу, відбувається встановлення режиму роботи, коефіцієнтів регулятора, а також налаштується режим роботи цифрового виводу, до якого підключений світлодіод. Програмна реалізація функція `setup` наведена нижче:

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  myPID.SetMode(AUTOMATIC);
  myPID.SetTunings(Kp, Ki, Kd);
  pinMode(3, OUTPUT);
}
```

Головний алгоритм роботи описується у функції `loop`. Першим кроком відбувається визначення поточного часу в мілісекундах. Це необхідно для подальшого формування лінійної зміни бажаного значення (`Setpoint`). Воно визначається за допомогою функції `map` та обмеження мінімального та максимального значення функцією `constrain`:

```
Setpoint = map(constrain(currentTime, 0, 20000), 0, 20000, 125, 175);
```

Таким чином, `Setpoint` лінійно змінюється в межах від 125 до 175, пропорційно часу, що пройшов від 0 до 20000 мілісекунд. У досліді було вказано два бажані значення керованої величини, початкове 125, і кінцеве 175. Ці значення є масштабованими значеннями рівня освітлення від фоторезистора. Мікроконтролер кодує значення фоторезистора за допомогою

10-бітного аналогово-цифрового перетворювача і у числовому значенні вони коливаються від 0 до 1023. Ці значення масштабуються з використанням функції `map` і записуються у змінну `Input`:

```
Input = map(analogRead(5), 0, 1024, 0, 255);
```

Наступним етапом є визначення значення сигналу керування, що здійснюється шляхом виклику методу об'єкта PID-регулятора `Compute`. Після чого відбувається формування ШІМ-сигналу, за допомогою виклику функції `analogWrite`, другим параметром якої є значення змінної `Output`.

Для відлагодження процесу роботи системи, а також збору даних відбувається надсилання даних від мікроконтролера до комп'ютера за допомогою методів об'єкту послідовного порту і встановлюється затримка  $dt = 100$  мілісекунд. Програмна реалізація функції `loop` наведена нижче:

```
void loop() {
  unsigned long currentTime = millis();
  Setpoint = map(constrain(currentTime, 0, 20000), 0, 20000, 125, 175);
  Input = map(analogRead(5), 0, 1024, 0, 255);
  myPID.Compute();
  analogWrite(3, Output);
  Serial.print(Input);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(Output);
  Serial.print(" ");
  Serial.println(Setpoint);
  delay(100);
}
```

Результат роботи системи, а також дані, що були зібрані під час досліді візуалізовано на рис. 2. Варто зазначити, що різкі зміни даних, що були отримані із вимірювального пристрою вказують на низьку інерційність процесу. У випадку із імплементацією цієї системи у систему керування процесу нагріву характер процесу буде відрізнятися.

Подальші кроки модифікації системи полягають у додаванні можливості задавати початкове та кінцеве значення керованої величини, а також часу протягом якого має змінюватись вихідна величина.

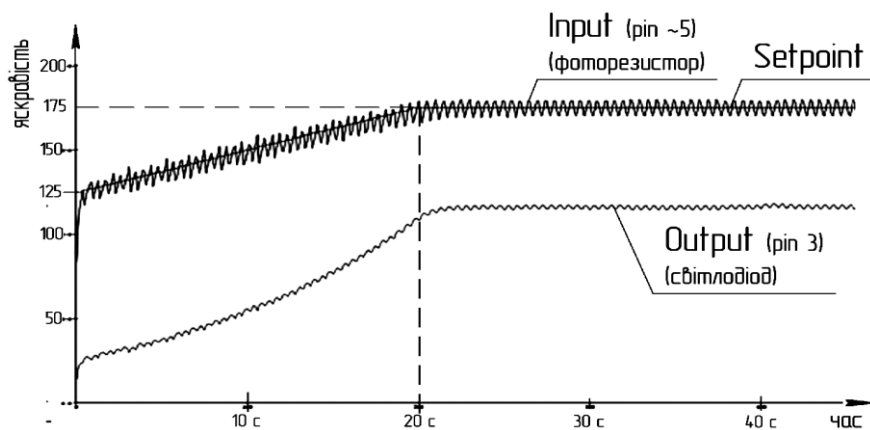


Рис. 2. Графік зміни значень Input, Output та Setpoint

Для впровадження даних модифікацій передбачається додавання пристроїв введення і виведення даних. Для задавання початкового і кінцевого значень передбачається використання матричної цифрової клавіатури, а також LCD-дисплею для відслідковування поточного стану процесу і заданих значень. У розрізі програмної реалізації необхідно впровадити кілька режимів роботи, а саме режим задавання вхідних параметрів: початкової температури, кінцевої температури і часу, протягом якого буде забезпечена зміна вихідної величини. Також необхідно передбачити проміжний режим, який буде забезпечувати попередній нагрів речовини до початкового значення. У режимі лінійного регулювання на екрані пристрою виведення передбачається відображати наступні дані: поточне значення температури від вимірювального пристрою, час, що

пройшов від початку проведення досліду, а також бажане значення температури на поточний момент часу.

### Висновок

Результати проведення досліду, наведені у статті, дозволяють зробити висновок, що запропонована система забезпечує лінійну зміну керованої величини і може бути застосована для системи керування температурою. Для вибору оптимальних коефіцієнтів PID-регулятора необхідно провести додаткові дослідження із врахуванням інерційності системи нагріву, а також врахувати масштабування даних від датчика температури та положення валу серводвигуна, який використовується для встановлення бажаних значень регульованої величини.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Спосіб програмного формування лінійного закону зміни температури нагрівника / Д. О.Стороженко, Н. В. Бунякіна, І. О. Іваницька, О. Г. Дрючко. – 2009. – Режим доступу до ресурсу: <https://uapatents.com/5-43549-sposib-programnogo-formuvannya-linijnogo-zakonu-zmini-temperaturi-nagrivnika.html>.
2. PID control on arduino. – 2017. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=crw0Hcc67RY&t=287s>.
3. Driver PID Settings. – 2023. – URL: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=9013](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=9013).
4. Kalsbeek J. The PID Controller / Jelle Kalsbeek. – 2017. – URL: <https://www.pid-tuner.com/pid-control/>.
5. Beauregard B. Arduino-PID-Library / Brett Beauregard – URL: <https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library>

Received (Надійшла) 11.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.11.2023

### Automated system of linear controlled variable regulation with a PID-controller

B. Boriak, O. Driuchko, D. Nenyh, O. Sukhorebryi

**Abstract.** The aim of this study was to develop a multifunctional software suite for generating a linear temperature change law for the thermo-analytical complex. The multifunctional thermo-analytical complex is designed for identifying substances based on temperatures of phase transitions. The study involved the development of a heating control system. To verify the system's functionality, an experiment involving a linear change in the desired value of the controlled variable was conducted. To approximate the conditions of the experiment as an executive mechanism of the system a light-emitting diode was used, while a photoresistor served as the measuring element. This allowed minimizing the resource costs for developing the control system prototype, although the dynamics of the heating process significantly differ from the proposed modification. According to the project's technical specifications, it is necessary to ensure the capability of adjusting a linearly controlled parameter. The system was implemented using the hardware-software platform Arduino. The research results presented in the article allow concluding that the proposed system ensures linear variation of the controlled parameter and can be applied to temperature control systems. To select the optimal coefficients for the PID controller, additional research considering the inertia of the heating system is necessary. It is also important to consider scaling the data from the temperature sensor and the position of the servo motor shaft used to set the desired values of the controlled parameter. This system allows combining the capabilities of a PID controller with real-time changes in the desired value during system operation. The research includes an electrical diagram, a description of the software implementation of the control system, and the results of the conducted experiment.

**Keywords:** Linear regulation, PID controller, Arduino, Closed-loop control system.

О. А. Кононова

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

## АВТОМАТИЗАЦІЯ АНАЛІЗУ РЕЧОВИН ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ П'ЄЗОРЕЗОНАНСНИХ СЕНСОРІВ

**Анотація.** Предметом статті є визначення автоматизації аналізу речовин, використовуючи п'єзореzonансні сенсори. **Мета** – опис запропонованої автором автоматизованої системи на основі п'єзореzonансних сенсорів для визначення речовин в газових середовищах, що доцільно використовувати в хімічній, мікробіологічній, харчовій промисловості, а також на підприємствах агропромислового комплексу. **Задача** – підвищення достовірності ідентифікації компонента при одночасній простоті апаратурної реалізації самого пристрою. **Висновки:** Використання автоматизованої системи для визначення речовин із застосуванням п'єзореzonансних сенсорів дозволяє значно підвищити оперативність і достовірність результатів визначення речовин, що отримуються із застосуванням п'єзореzonансних сенсорів, оскільки процес обробки даних безперервний та отримувани результати оперативно коректуються під час отримання нових даних.

**Ключові слова:** п'єзореzonансні сенсори, автоматизована система, частотомір.

### Вступ

**Постановка задачі.** Для аналізу газових середовищ широкого поширення набули п'єзореzonансні сенсори (ПРС). Традиційно навантаження на ПРС, що діють за принципом об'ємно-акустичних хвиль, розглядається як навантаження маси, змінної при визначенні цільового компонента. Такий підхід сповна виправданий, якщо товщина плівки модифікатора набагато менше довжини акустичної хвилі (рекомендується обмежувати товщину плівки модифікатора в межах 0,1...0,3% від довжини акустичної хвилі). При цьому незначна зміна маси електроду ПРС лінійно залежить від зміни частоти його коливань. Розглянемо пристрій, що складається з кварцового резонатора з нанесеним на нього сорбентом, генератора, мікроконтролера, зразкового генератора, що синхронізує роботу мікроконтролера і комп'ютера, який обробляє результати вимірів. Цей пристрій може служити прикладом подібних систем вимірювання. Проте недоліками такого пристрою є невисока точність виміру частоти у наслідок обмежених технічних можливостей мікроконтролера та відсутність можливості під час експерименту змінювати період виміру. Таким чином, аналіз цієї конструкції й інших відомих технічних рішень показав, що вони або досить складні при прийнятній достовірності ідентифікації визначуваного компонента, або виконані просто, але при цьому достовірність ідентифікації недостатня.

**Аналіз літератури.** В законі [1] визначаються основні відомості про метрологію та метрологічну діяльність в державі. Питання експлуатації засобів вимірювальної техніки викладені в навчальних посібниках та підручниках [2-5] керівних документах та літературі [6-12]. Але в проведеному аналізі не визначено питання автоматизації аналізу речовин із застосування п'єзореzonансного сенсору, що доцільно використовувати в хімічній, мікробіологічній, харчовій промисловості, а також на підприємствах агропромислового комплексу.

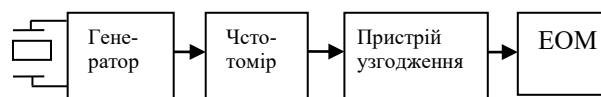
**Метою статті** є опис запропонованої автором автоматизованої системи на основі ПРС для визна-

чення речовин в газових середовищах, яку доцільно використовувати в хімічній, мікробіологічній, харчовій промисловості, а також на підприємствах агропромислового комплексу.

### Основний матеріал

При розробці автоматизованої системи, на основі ПРС системи, вирішувалося завдання підвищення достовірності ідентифікації компонента при одночасній простоті апаратурної реалізації самого пристрою. Для чого в системі було запропоновано задіяти зразковий частотомір (наприклад, ЧЗ-64), в напівавтоматичному режимі що вимірює частоту ПРС, який управляється персональним комп'ютером, що оперативно обробляє результати вимірювання з врахуванням умов, що задаються оператором.

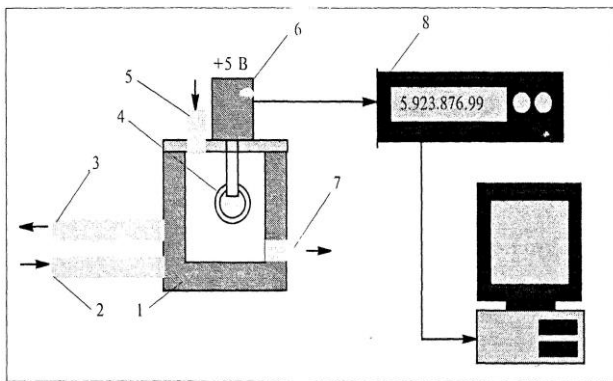
Структурна схема автоматизованої системи приведена на рис. 1.



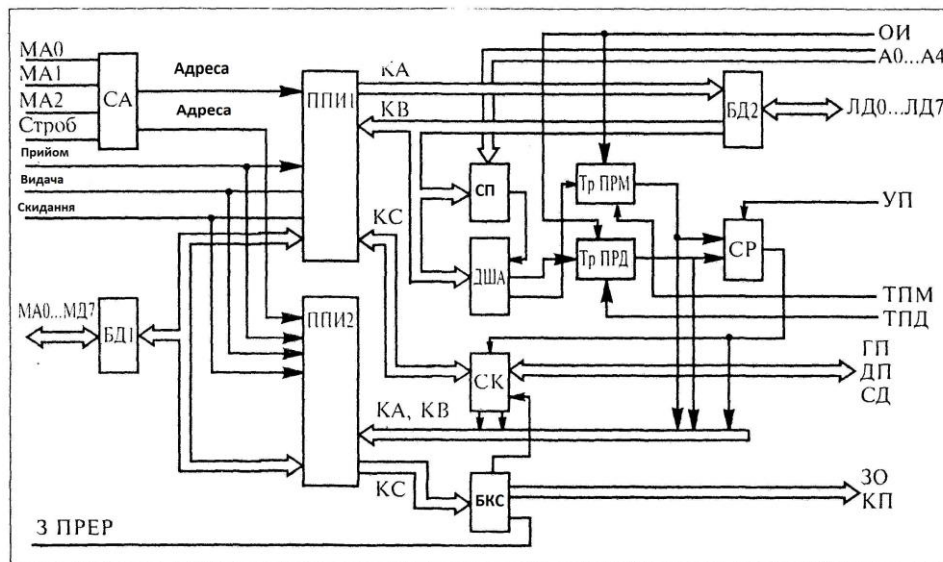
**Рис. 1.** Структурна схема автоматизованої системи аналізу речовин з використанням п'єзореzonансних сенсорів

На рис. 2 приведена схема автоматизованої системи аналізу речовин із застосуванням п'єзореzonансного сенсору (ПРС). Система працює наступним чином. Концентрація досліджуваної речовини (аналіта) встановлюється за швидкістю його сорбції на поверхні сорбенту, розташованого на металевих електродах ПРС. Швидкість сорбції визначається непрямим виміром маси речовини, що приводить до зменшення частоти власних коливань в результаті сорбції на електродах ПРС.

Період автоматичних вимірів задає оператор комп'ютера, виходячи із завдань дослідження. Це дозволяє оперативно коректувати протікання експерименту, з підвищеною точністю проводити виміру на характерних ділянках ізотерми сорбції, а також в автоматичному режимі реєструвати і обробляти дані з використанням різних методів цифрової обробки сигналів далі оптимізувати умови аналізу речовин.



**Рис. 2.** Схема автоматичного управління системою аналізу речовин з використанням п'єзореzonансних сенсорів, де: 1 – вічко детектування; 2,3 – трубопровід для входу та виходу теплоносія, відповідно; 4 – п'єзореzonансний сенсор; 5,7 – патрубок для вводу та виводу проби, що відповідно аналізується; 6 – генератор коливань ПРС; 8 – частотомір



**Рис. 3.** Схема інтерфейсу 3.049.041 для створення пари частотоміра із каналом загального використання

Канали КА і КВ ППІ 2 використовуються для введення сигналів полягання в режимах прийому і передачі модуля, а канал КС — для виведення сигналів, що управляють, в КЗП.

Схема порівняння (СП) порівнює адреси приладу в системі КЗП із станом адресних перемикачів А0 - А4. Вихідний сигнал СП вирішує роботу — дешифратора адреси (ДША), що управляє тригерами прийому (ТРПРМ) і передачі (ТРПРД). Ці тригери спільно з схемою режиму СР визначають режим роботи інтерфейсу — на прийом або на передачу.

Схема квітування зв'язує сигнали синхронізації КЗП (ДП, ГН і СД) з сигналами синхронізації введення/виводу даних ППІ 1. Буфер керуючих сигналів (БКС) підсилює, сигнали, що управляють, КЗП (КП і ЗО) і сигнал "запит переривання" (З ПРЕР).

Буфер даних (БД2) підсилює сигнали даних (канал КА ППІ 1), що виводяться, і буферізує сигнали даних, що вводяться (канал КВ ППІ 1). Працює інтерфейс в двох основних режимах - прийому і

Пристрій узгодження (ПРС) з персональним комп'ютером виконаний з використанням інтерфейсу 3.049,041, призначеного для сполучення частотомира з каналом загального користування (КЗП).

Оснoву структурної схеми складають паралельні інтерфейси (ППІ1) і (ППІ2), що зв'язують шини даних з сигналами інтерфейсу (рис. 3).

Селектор адреси СА виконує функцію адресації ППІ 1 і ППІ 2 залежно від стану вхідних адресних сигналів МА0, МА1, МА2 і СТРОБ). Двонаправлений трьохстабільний буфер даних БД1 виконує роль підсилювача потужності сигналів даних від ППІ 1 і ППІ 2 і здійснює буферизацію їх входів відносно шини даних МДО-МД7. Кожен з паралельних інтерфейсів розгалужує шину даних на три канали. Канал КА ППІ 1 використовується для виведення даних в канал загального користування (КЗП), канал КВ — для введення даних з КЗП, канал КС — для формування сигналів квітування (синхронізації).

передачі. У режимі прийому дані, що вводяться, апаратний заносяться у вхідний регістр КВ ППІ 1. Апаратний інтерфейс підтверджує прийом даних. Потім виробляється сигнал З ПРЕР, мікропроцесор уривається, вводиться байт стану, що дозволяє ідентифікувати дані, що вводяться, після чого вводяться безпосередньо дані, і інтерфейс апаратний повідомляє про готовність до прийому наступного байта. Дані, що вводяться, дешифруються програмно. Апаратний дешифрується лише адреса приладу на прийом або передачу, в результаті встановлюється або скидається один з тригерів режиму Тр ПРМ або Тр ПРД.

У режимі передачі програмним способом визначається готовність приймаючого приладу до прийому даних. Потім виводяться дані через канал КА ППІ 1. Апаратно формується сигнал СД, програмно визначається факт прийому даних приладом-приймачем, і цикл передачі повторюється заново. У будь-який момент часу через інтерфейс може бути переданий сигнал ЗО.

Приладові сигнали ТПМ і ТПД переводять інтерфейс примусово в режим прийому або передачі.

Спектр адреси СА зібраний на МС1 і МС4. 1. Розряди адреси МА0 і МА1 через буфер підключаються до адресних входів ПП1 і ПП2. Дворозрядний дешифратор адреси (МС4.1) формує сигнали “вибір кристала” ПП1 і ПП2 залежно від стану входу МА2. Сигнал “Строб” є виходом дешифратора адреси, розташованого зовні інтерфейсу. Сигнал на його виході низького рівня формується при адресах введення-виведення F0, F1...F7 (шістнадцятиричні коди).

Буфер БД побудований на двонаправлених трьохстабільних шинних формувачах. Напрямок передачі буфера управляється сигналом *Прийом*. Низький рівень цього сигналу включає БД1 в напрямі від інтерфейсу до мікропроцесора.

ПП1 і ПП2 є дві БІС. ПП1 (МС5) працює в режимі “1” (стробоване введення даних в канал КВ і стробоване виведення даних з каналу КА). ПП2 (МС6) працює в режимі “0” (введення по каналах КА і КВ у вивід в режимі побітової установки по каналу КС).

П'ятирозрядна схема порівняння СС побудована на МС12 і МС7.1. Сигнал порівняння підключається до входу ДША (МС 13). Виходи ДША підключаються до входів установки-скидання RS - тригерів Тр ПРМ(МС5) і Тр ПРД (МС 16).

Схема режиму СР виконана на МС7.1, МС8.1, МС11.3 і МС11.4. На виході МС11.3 поява високого рівня відповідає режиму прийому, а на виводах МС11.4 — режиму передачі.

Схема квітуння СК пов'язує двохсигнальну синхронізацію ПП1 з трьохсигнальною синхронізацією Коп. Схема пристрою СК містить, крім того, одновібратор МС14, що формує імпульси неготовності у момент початку роботи інтерфейсу в режимі прийому. БД2 і БКС виконані на схемах з відкритим колекторним виходом.

Швидкість обміну даними через інтерфейс залежно від режиму роботи вагається в межах від 100 до 1000 байт/с.

## Висновки

1. Результати проведених досліджень дозволяють рекомендувати автоматизовану систему для визначення речовин із застосуванням п'єзореzonансних сенсорів.

2. Використання автоматизованої системи для визначення речовин із застосуванням п'єзореzonансних сенсорів дозволяє значно підвищити оперативність і достовірність результатів визначення речовин, що отримуються із застосуванням п'єзореzonансних сенсорів, оскільки процес обробки даних безперервний та отримувані результати оперативно коректуються під час отримання нових даних.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України “Про метрологію та метрологічну діяльність” // Відомості Верховної Ради (ВВР). – 2014. – № 30, ст.1008.
2. Кононов В. Б. Застосування електричних вимірювань засобами вимірювальної техніки в умовах проведення АТО. Нач. посіб./ В. Б. Кононов, А. М. Науменко та ін. –Х. : ХНУПС, 2018 – 392 с.
3. Кононов В. Б. Основи експлуатації засобів вимірювальної техніки військового призначення в умовах проведення АТО. Навч. посіб. / В. Б. Кононов, А. М. Науменко та ін. –Х. : ХНУПС, 2017 – 288 с.
4. Кононов В. Б. Використання вимірювальних перетворювачів виїзними метрологічними групами в умовах проведення операції об'єднаних сил. Підручник. / В. Б. Кононов, І.В.Толок, А. М. Науменко та ін. –Х. : ХНУПС, 2019 – 288 с.
5. Кононов В.Б. Metrology and standardization part III: навч. посіб./ В.Б. Кононов, А.М. Науменко, О.В. та ін. – Х.:ХНУПС, 2021.-64 с.
6. International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology. ISO – Geneva, 1993. ISBN 0-948926-08-2.
7. ILAC G 17: 2002 “Introducing the Concept of Uncertainty of Measurement in Testing in Association with the Application of the Standard ISO/IEC 17025”. [www.ilac.org](http://www.ilac.org)
8. ILAC G 15: 2001 “Guidance for Accreditation to ISO/IEC 17025”. [www.ilac.org](http://www.ilac.org)
9. ISO/TS 21748:2004. Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation.
10. Saravana, Balaji B, Karthikeyan. N.K. and Raj Kumar.R.S., (2018). “Fuzzy service conceptual ontology system for cloud service recommendation”, Computers and Electrical Engineering, Vol. 69. PP. 435-446, DOI: <https://doi.org/10.1504/IJBIDM.2018.088435>.

Received (Надійшла) 18.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.11.2023

## Automation of analysis of substances using piezoresonance sensors

O. A. Kononova

**Abstract.** The subject of the article is the determination of the automation of the analysis of substances using piezoresonance sensors. The goal is to describe the automated system proposed by the author based on piezo-resonant sensors for the determination of substances in gas environments, which is advisable to use in the chemical, microbiological, food industry, as well as at enterprises of the agro-industrial complex. The task is to increase the reliability of component identification while simplifying the hardware implementation of the device itself. Conclusions: The use of an automated system for the determination of substances using piezo-resonance sensors allows to significantly increase the efficiency and reliability of the results of the determination of substances obtained with the use of piezo-resonance sensors, since the data processing process is continuous and the obtained results are quickly corrected when receiving new data .

**Keywords:** piezoresonance sensors, automated system, frequency counter.

Л. І. Леві, М. К. Бороздін, О. Є. Зима

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

## ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ КОЕФІЦІЄНТА ВОЛОГОПРОВІДНОСТІ ҐРУНТУ

**Анотація.** Інформація про вологопровідність може бути використана для математичного (кількісного) аналізу різних випадків перенесення ґрунтової вологи, що відбуваються в природних умовах. Сюди входить фільтрація води в ґрунті, потік води від рівня ґрунтових вод до поверхні, поглинання ґрунтової вологи та потік ґрунтової вологи до коренів рослин. Універсальною функцією, яка відображає вплив усіх факторів, що можуть впливати на енергетичний стан води в ґрунті, є водний потенціал. Як відомо, вода завжди рухається від більш високого потенціалу до більш низького. Діюча сила – це вільна енергія або градієнт водного потенціалу ґрунту, який відображає силу, що викликає ізотермічний потік води. В ізотермічних умовах компонентами водного потенціалу є капілярний тиск, осмотичні сили та сила тяжіння. В результаті, вологопровідність ненасичених ґрунтів не характеризується єдиним значенням (як у випадку транспорту насиченої води), а скоріше є функцією тиску всмоктування або вологості ґрунту. Комплексний характер залежності ґрунту і води в термінах «волога – потенційна енергія – провідна вологість» часто подається у вигляді емпіричних формул і графіків. Було запропоновано багато емпіричних формул для апроксимації функції вологопровідності, які відтворюють цю функцію через певні проміжки часу з певною точністю. В даний час актуальним є завдання розробки технологій, що забезпечують економічну та екологічну ефективність регулювання води в системах осушення та зволоження. У зв'язку з цим необхідно створити повну математичну модель ґрунту на основі рівняння вологопереносу, одним із основних параметрів якого є коефіцієнт вологопровідності. Метою статті є розробка нового методу визначення параметра водопровідності ненасиченої зони ґрунту на основі прямої багатопараметричної статичної штучної нейронної мережі, що сприяє підвищенню точності вимірювання. Коефіцієнт вологопровідності, який описує фізичні процеси в ґрунті, можна визначити за допомогою ряду емпіричних формул, які містять емпіричні коефіцієнти. Альтернативним методом є використання нейронної мережі, за допомогою якої на основі досліджуваного зразка визначається коефіцієнт вологопровідності або будь-який інший параметр ґрунту, залежно від експериментальних даних, встановлений на досить високе значення точності. Нейронну мережу, навчену на навчальному наборі даних, можна успішно використовувати на незалежних тестових зразках для конкретного типу ґрунту, який не входить до навчального набору.

**Ключові слова:** диференціальне рівняння вологопереносу, коефіцієнт вологопровідності, функції активації прихованого шару нейромережі, навчання нейронної мережі.

### Вступ

**Постановка проблеми.** При застосуванні диференціального рівняння водного транспорту необхідно визначити коефіцієнти і функції, які є параметрами цього рівняння, та описати фізичний процес водного транспорту. Ці ознаки включають функцію водоутримання або основні гідрофізичні властивості, а саме залежність тиску всмоктування ґрунту від вмісту води  $\psi(W)$ , а також функцію водопровідності ненасичених ґрунтів.

У функції вологопровідності розрізняють характеристичну криву вологопровідності, що зв'язує коефіцієнт вологопровідності і потенціал вологості ґрунту  $k(\psi)$ , і характеристичну криву, що зв'язує коефіцієнт вологопровідності ґрунту та його вологоємність. Вміст  $k(W)$ . Водопровідна здатність ґрунту є важливим показником у різноманітних розрахунках полігонів [1-5].

Інформація про вологопровідність може бути використана для математичного (кількісного) аналізу різних випадків переміщення ґрунтової вологи, що відбувається у природних умовах. До таких випадків переміщення слід віднести:

- фільтрацію води через ґрунт,
- надходження вологи від рівня ґрунтових вод до поверхні,
- поглинання вологи ґрунтом,
- надходження ґрунтової вологи до коріння рослин.

Універсальною функцією, яка відображає вплив усіх факторів, які можуть впливати на енергетичний стан води в ґрунті, є водний потенціал.

Інформація про вологопровідність може бути використана для математичного (кількісного) аналізу різних випадків руху ґрунтової вологи, що відбуваються в природних умовах. Сюди входять:

- фільтрація води в ґрунті,
- потік води від рівня ґрунтових вод до поверхні,
- поглинання ґрунтової вологи,
- потік ґрунтової вологи до коренів рослин.

Водний потенціал є універсальною функцією, яка відображає вплив усіх факторів, що можуть впливати на енергетичний стан води в ґрунті. Як відомо, вода завжди рухається від вищого потенціалу до нижчого. Ефективна сила – це градієнт вільної енергії або потенційний градієнт вологості ґрунту і відображає силу, яка викликає ізотермічний потік вологи. В ізотермічних умовах складовими водного потенціалу є: капілярний тиск, осмотична сила, сила тяжіння. В результаті гідравлічна провідність (капілярна провідність  $k$ , см/добу) ненасичених ґрунтів є не єдиною величиною (як у випадку транспортування насиченої води), а скоріше тиском всмоктування  $k = k(\psi)$  або вологістю ґрунту  $k = k(W)$  [1 – 5].

За вологопровідністю ґрунтовий профіль можна розділити на дві частини. Знизу – ділянки повного насичення, де рух вільної води відбувається під дією сили тяжіння за законами фільтрації, а

зверху - ділянки, де відбувається рух води в ненасичених ґрунтах.

Найпоширенішим методом визначення  $k(W)$  є експериментальний метод, що базується на аналізі даних про міграцію вологи. Досягти стаціонарної течії не завжди технічно просто, а експерименти займають багато часу. Нестационарні методи вимагають від експериментатора менше часу, ніж стаціонарні, але надійність і точність отриманих даних залежить від того, наскільки умови експерименту задовольняють ряд теоретичних припущень.

Найпоширенішим методом визначення  $k(W)$  є експериментальний метод, заснований на аналізі даних водного транспорту: методи стаціонарного та нестационарного потоків. З технічної точки зору досягти умов сталого потоку не завжди легко, і такі експерименти також займають значну кількість часу. Хоча перехідні методи вимагають від експериментатора менше часу, ніж методи стаціонарного режиму, надійність і точність отриманих даних залежить від того, наскільки умови експерименту відповідають ряду теоретичних припущень.

Комплексний характер залежності ґрунт-вода у вигляді «вологопотенціал-вологопровідність» найчастіше виражається у вигляді емпіричних формул і діаграм. Для функції провідності води було запропоновано багато емпіричних наближень, які відтворюють цю функцію з певною точністю на певній відстані. В даний час актуальним є завдання розробки технологій, що забезпечують економічну та екологічну ефективність кондиціонування води в системах осушення та зволоження. У зв'язку з цим необхідно розробити відповідну математичну модель ґрунту на основі рівняння переносу води. Його основним параметром є вологопровідність.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Кількісна оцінка потоку води залежить від умов, за яких вода рухається в ґрунті. Ґрунт насичений водою, якщо пори повністю заповнені водою, а ґрунт ненасичений водою, якщо лише частина пори заповнена водою, а інша частина заповнена повітрям. Характер руху вологи в насичених пористих середовищах під дією гідростатичного тиску можна пояснити відомим законом Дарсі, який стверджує, що швидкість руху вологи пропорційна градієнту тиску води. Тиск води є єдиною силою, яка переміщує воду в насичених ґрунтах, і її легко виміряти.

У міру того, як ґрунти переходять від насичених умов до ненасичених, моделі, які контролюють водний баланс і рух, стають значно складнішими. Характер руху води в таких ґрунтах сильно відрізняється від руху рідини в умовах фільтраційного потоку.

Особливістю цього руху є те, що межі течії не залишаються постійними, пори частково заповнені, і вміст води в ґрунті може стати нерівномірним у різних місцях однорідного ґрунту. Вода може рухатися не тільки у вигляді безперервного (об'ємного) потоку, а й у вигляді мембрани, що покриває поверхню частинок ґрунту і тече під капілярним тиском меніска. Ці особливості доводять, що про-

відність води може змінюватися як у просторі, так і в часі.

Універсальною функцією, що відображає вплив всіх факторів, які можуть впливати на енергетичний стан води в ґрунті, є потенціал вологи. Як відомо, вода (так само як тепло і електричний струм) переміщується завжди від більшого потенціалу до меншого. Діючою силою при цьому буде градієнт вільної енергії або потенціалу ґрунтової вологи, що виражає сили які викликають ізотермічний потік вологи.

В ізотермічних умовах складовими потенціалу вологи є:

- капілярний тиск,
- осмотичні і гравітаційні сили.

Універсальною функцією, яка відображає вплив усіх факторів, які можуть впливати на енергетичний стан води в ґрунті, є водний потенціал. Як відомо, вода (як тепло та електричний струм) завжди рухається від вищого потенціалу до нижчого. Ефективною силою в цьому випадку є градієнт вільної енергії або потенціал вологості ґрунту, який представляє силу, що викликає ізотермічний потік води.

В ізотермічних умовах складовими водного потенціалу є: капілярний тиск, осмотична сила, сила тяжіння

Внаслідок цього, гідравлічна провідність ненасичених вологою ґрунтів (капілярна провідність  $k$ , см/добу) характеризується не єдиним значенням (як при насиченому вологопереносі), а обов'язково функцією від всмоктуючого тиску  $k = k(\psi)$ , або від вологості ґрунту  $k = k(W)$ .

Таким чином, якщо припустити, що гідравлічна провідність ґрунту є функцією об'ємного вмісту вологи в ґрунті  $k = k(W)$ , то рух води у ненасичених ґрунтах також відбувається згідно закону Дарсі. У результаті вологопровідність (капілярна провідність  $k$ , см/добу) ненасичених водою ґрунтів не характеризується одним значенням (як у випадку переносу насиченої води), а обов'язково є функцією тиску  $k = k(\psi)$  або вміст води в ґрунті  $k = k(W)$ . Тому рух води в ненасичених ґрунтах також відбувається за законом Дарсі, припускаючи, що гідравлічна провідність ґрунту є функцією об'ємного вмісту води в ґрунті  $k = k(W)$ .

На величину коефіцієнта провідності води  $k$  впливає багато факторів. Це механічний і агрегатний склад ґрунту, структура, вологість, тиск (потенціал) всмоктування. У зв'язку з цим в даний час не існує теоретичного способу визначення  $k$ , його значення визначається математично на основі спеціальних експериментальних даних і даних спостережень.

Найпоширеніший метод визначення  $k$  базується на аналізі даних водного транспорту. Це метод сталого потоку та метод нестационарного потоку. Хоча ці методи прості, їх використання обмежене вузьким діапазоном значень  $k$ . Крім того, найбільшим недоліком є довший експериментальний час, який збільшується з квадратом довжини зразка ґрунтового моноліту. Цей спосіб реалізуєть-



ся за допомогою витратоміра і колонки. Застосування цих рівнянь потребує багато додаткової інформації про фізико-механічні властивості ґрунту та фізичні властивості води, що вимагає проведення великої кількості додаткових експериментів для отримання цієї інформації.

До основних гідрофізичних властивостей ґрунту належать:

залежність тиску всмоктування від об'ємної вологості ґрунту,

залежність вологопровідності від тиску всмоктування ґрунту,

залежність вологопровідності від об'ємної вологості ґрунту.

**Формулювання мети статті.** Розробка нового методу параметричної ідентифікації коефіцієнта вологопровідності ненасичених зон ґрунту на основі статичної багатоварової штучної нейронної мережі прямого розповсюдження з метою підвищення точності його визначення є метою даної статті.

### Основна частина

Розробимо альтернативну модель для розрахунку коефіцієнта вологопровідності ґрунту  $k$  на базі нейронних мереж. Для цього створимо мережу виду:

$$k = NN(W),$$

де  $W$  – значення вологості ґрунту;  $NN$  – перетворення нейронної мережі.

Вивчимо вплив типу функції активації прихованого шару нейронної мережі на точність її роботи. Для цього побудуємо двошарову нейронну мережу з наступними параметрами [1 – 5]:

кількість нейронів у першому шарі – 1,

кількість нейронів у другому шарі – 1,

функція активації нейронів другого шару – лінійна ('purelin'),

метод навчання - Левенберга-Марквардта ('trainlm'),

функція регулювання ваг і переміщень – градієнт з інерційною складовою ('learnngdm'),

функція помилки – квадратична ('mse').

Дослідимо, яким чином тип функції активації прихованого шару нейронної мережі впливає на точність її роботи. Для цього створимо двошарову нейронну мережу з такими параметрами:

кількість нейронів у першому шарі дорівнює одному,

кількість нейронів у другому шарі дорівнює одному,

функція активації нейронів у другому шарі є лінійною ('purelin'),

метод навчання є методом Левенберга-Марквардта ('trainlm'),

функції коригування ваги та переміщення є градієнтами з інерційною складовою ('learnngdm'),

функція похибки є квадратичною функцією ('mse') [1 – 5].

Згідно з результатами дослідження, найкраща точність нейронних мереж досягається за допомогою сигмоїдної (логістичної) і тангенціальної функцій активації нейронів прихованого шару. Мережі

з радіальними базисними функціями для активації нейронів прихованого шару дещо відрізняються точністю.

Дослідимо, яким чином кількість нейронів у прихованому шарі нейронної мережі впливає на точність її роботи. Для цього побудуємо двошарову нейронну мережу з такими параметрами:

кількість нейронів у першому шарі є змінною,

функція активації нейронів у першому шарі сигмоподібна ('logsig'),

кількість нейронів у другому шарі дорівнює одному,

функція активації нейронів у другому шарі є лінійною ('purelin'),

методом навчання є метод Левенберга-Марквардта ('trainlm'),

функцією коригування ваги та переміщення є градієнт з інерційним компонентом ('learnngdm'),

функцією помилки є квадратична функція ('mse').

Будемо змінювати кількість нейронів прихованого шару від 1 до 20 і проаналізуємо точність мережі на вибірці тестових даних.

Дослідження показують, що чотирьох нейронів у прихованому шарі нейронної мережі достатньо. Збільшення кількості нейронів істотно не покращує точність нейронної мережі та сповільнює швидкість її навчання. Тому збільшувати кількість нейронів прихованого шару понад чотири не рекомендується.

Дослідимо вплив функції активації нейронів прихованого шару нейронної мережі на точність її роботи. Для цього побудуємо двошарову нейронну мережу з такими параметрами:

кількість нейронів у першому шарі дорівнює чотирьом,

кількість нейронів у другому шарі дорівнює одному,

функція активації нейронів у другому шарі є лінійною ('purelin'),

методом навчання є метод Левенберга-Марквардта ('trainlm'),

функція, яка встановлює ваги та переміщення, є градієнтом з інерційною складовою ('learnngdm'),

функція помилки є квадратичною функцією ('mse').

Результати показують, що точність роботи нейронних мереж із сигмоподібною, радіальною базисною та тангенціальною функціями активації підвищується при збільшенні кількості нейронів прихованого шару, тоді як значення СКВ трьох мереж практично однакові. Мережі з лінійними функціями активації не підвищили свою точність. Результати показують, що точність зростає зі збільшенням кількості нейронів прихованого шару нейронних мереж із сигмоїдальною, радіально-основною та тангенціальною функціями активації, але СКВ трьох мереж майже однаковий. Мережі з лінійними функціями активації не підвищили свою точність.

Дослідимо, яким чином збільшення кількості шарів нейронів впливає на точність нейронної ме-

режі. Для цього побудуємо тришарову нейронну мережу з такими параметрами:

кількість нейронів у першому шарі дорівнює чотирьом,

функція активації нейронів у першому шарі є сигмоподібною ('logsig'),

кількість нейронів у другому шарі дорівнює числу  $n$ ,

функція активації нейронів у другому шарі є сигмоподібною ('logsig'),

кількість нейронів у третьому шарі дорівнює одному,

функція активації нейронів третього шару є лінійною ('purelin'),

методом навчання є метод Левенберга-Марквардта ('trainlm').

функція налаштування ваг і зміщень є градієнтною з інерційною складовою ('leamgdm'),

функція помилки є квадратичною функцією ('mse').

Відповідно до результатів дослідження, введення другого прихованого шару не покращує якість нейронної мережі. Завдяки збільшенню кіль-

кості нейронів у прихованому шарі, нейронні мережі з сигмоподібною, радіальною та тангенціальною функціями активації покращили свою точність, тоді як значення СКВ для всіх трьох мереж були майже однаковими. Мережа з лінійною функцією активації не покращує свою точність.

### Висновки

Коефіцієнт вологопровідності, який описує фізичні процеси в ґрунті, можна визначити за допомогою ряду емпіричних формул, які містять емпіричні коефіцієнти.

Альтернативним методом є використання нейронної мережі, за допомогою якої на основі досліджуваного зразка визначається коефіцієнт вологопровідності або будь-який інший параметр ґрунту, залежно від експериментальних даних, встановлений на досить високе значення точності.

Нейронну мережу, навчену на певному навчальному наборі даних, можна успішно використовувати на незалежних тестових зразках для конкретного типу ґрунту, який не входить до навчального набору.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ямпольський Л.С. Нейротехнології та нейросистеми: [монографія]. К.: – Дорадо-Друк, 2015. – 508 с.
2. Леві Л.І. Керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при крапельному зволоженні на основі нечіткої логіки. // Збірник наукових праць: Системи управління, навігації та зв'язку Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» / - №2 (60), 2020. – С. 27 – 30.
3. Schmidhuber J. Deep Learning in Neural Networks: An Overview // Neural Networks. – 2015. – Vol. 61. – P. 85–117.
4. Леві Л.І. Інтелектуальні інформаційні технології в ідентифікації і керуванні складними технічними об'єктами в умовах невизначеності: [монографія]. – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2021. – 194 с.
5. Субботін С.О. Нейронні мережі: навчальний посібник / С.О. Субботін, А.О. Олійник; під заг. ред. проф. С.О. Субботіна. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. – 132 с.

Received (Надійшла) 04.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 08.11.2023

### Application of neuronnetwork technologies for the identification of the moisture conductivity coefficient of the soil

L. Lievi, M. Borozdin, O. Zyma

**Abstract.** Information on moisture conductivity can be used for mathematical (quantitative) analysis of various cases of soil moisture regulation occurring in natural conditions. This includes soil water filtration, water flow from the water table to the surface, soil moisture uptake, and soil moisture flow to plant roots. Water potential is a universal function that reflects the influence of all factors that can affect the energy state of water in the soil. As you know, water always moves from a higher potential to a lower one. The active force is the free energy or soil water potential gradient that represents the force that causes isothermal water flow. In isothermal conditions, the components of the water potential are capillary pressure, osmotic forces, and gravity. As a result, the moisture conductivity of unsaturated soils is not characterized by a single value (as in the case of saturated water transport), but rather is a function of suction pressure or soil moisture. The complex nature of the dependence of soil and water in terms of "moisture - potential energy - conductive moisture" is often presented in the form of empirical formulas and graphs. Many empirical formulas have been proposed to approximate the moisture conductivity function, which reproduce this function at certain time intervals with a certain accuracy. Currently, the task of developing technologies that ensure the economic and ecological efficiency of water regulation in drainage and humidification systems is relevant. In this regard, it is necessary to create a complete mathematical model of the soil based on the moisture transfer equation, one of the main parameters of which is the moisture conductivity coefficient. The purpose of the article is to develop a new method for determining the water conductivity parameter of the unsaturated zone of the soil based on a direct multilayer static artificial neural network, which contributes to increasing the accuracy of the measurement. The coefficient of moisture conductivity, which describes the physical processes in the soil, can be determined using a number of empirical formulas that contain empirical coefficients. An alternative method is the use of a neural network, with the help of which the coefficient of moisture conductivity or any other parameter of the soil, depending on the experimental data, is set to a sufficiently high value based on the studied sample. precision. A neural network trained on the training data set can be successfully used on independent test samples for a specific soil type that is not included in the training set.

**Keywords:** differential equation of moisture transfer, coefficient of moisture conductivity, activation functions of the hidden layer of the neural network, learning of the neural network.

Helen Makogon<sup>1</sup>, Oleksandr Serpukhov<sup>1</sup>, Tetiana Rybak<sup>1</sup>,  
Oleksandr Tereshchenko<sup>1</sup>, Oleksandr Lavrut<sup>2</sup>, Vladyslav Sukhoteplyi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Military Institute of Tank Troops of National Technical University, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup> National Army Academy named after Hetman Petro Sahaidachnyi, Lviv, Ukraine

<sup>3</sup> Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

## BATTLE PLANNING AND ORGANIZATION LOGISTICS SUPPORT IN THE FORMS AND METHODS OF NATO STANDARDS MILITARY MANAGEMENT TOOLS BASED ON THE USE OF THE GAME THEORY MATHEMATICAL APPARATUS

**Abstract.** The **subject matter** of the article is the analysis of the decision-making options for combat operations in the sphere of operation of the S-4 section of the headquarters of the military unit. The **goal** of the study is the development of the methodology of the military raffle according to NATO standards for the analysis of decision-making options for combat operations by applying the mathematical apparatus of game theory. **The tasks** to be solved are: to conduct an analysis of the methods recommended by NATO standards for a military draw; from the point of view their viability objectivity assessing to formulate a matrix game based on an a posteriori analysis of action options to make a decision on planning and organizing a battle in the field of the S-4 section operation. The **methodological basis** of the research was general scientific and special methods of scientific knowledge. General scientific and special **methods** of scientific knowledge are used. The following **results** were obtained: The adequacy of the mathematical apparatus of game theory for the formal description of the decision-making process for combat operations, taking into account all possible risks, has been clarified. **Conclusions** The method of analyzing options for making a decision on combat operations using the mathematical apparatus of game theory is one that is devoid of subjectivity. The solution of the matrix game compiled on the basis of data on combat operations in the sphere of operation of the S-4 headquarters section of the military unit is the basis of the methodology of logistical support for the planning and organization of the battle in the forms and methods of the military management toolkit according to NATO standards.

**Keywords:** decision-making options, S-4 section of the military headquarters, military raffle according to NATO standards, matrix game

### Formulation of the problem and research tasks

Effective implementation of unit management procedures and coordination of available forces and means is impossible without taking into account risks, situational conditions, own capabilities and possible options for the enemy's actions. The analysis of possible options for actions, including with the help of a military raffle, is a promising toolkit of military management according to NATO standards. Modeling a military operation in the sense of considering the most likely and dangerous options for the enemy's actions and one's own involves drawing up a table of analysis of options for making a decision. Based on the selected evaluation criteria, the headquarters determines the relative effectiveness and objectivity of one course of action relative to others. The analysis of action options for decision-making is carried out on the basis of a matrix, the values of the elements of which are determined by an expert method, and during the briefing of the relevant officials. Expert evaluations are usually subjective, and the set of decision-making options with the help of "brainstorming" may not be complete enough. Therefore, the development of a methodology for the analysis of an action option for making a decision on combat operations based on scientific approaches is a **relevant** task.

### Analysis of recent research and publications

Recommendations for planning and organizing a battle according to NATO standards provide that for each element of the method of conducting an operation (combat operations) the possibility is assessed and the

necessity of carrying out appropriate security measures for the use of units is considered.

At the same time, the forecasting of probable measures of the enemy to mislead our units [1] is carried out. At the stage of comparing options for actions, the assessment is carried out in accordance with the predicted factors (the function of conducting the battle) and the expected factors (the ratio of the number of forces and means and combat potentials).

Usually, the developed action options are evaluated according to viability (realism) criteria:

– Suitable one consists in its adequacy to the nature of future actions, real and predicted conditions of the situation and the possibility of achieving the goal of the operation (combat operations) in the event of its implementation;

– Feasible one characterizes its compliance with the available (allocated) time and amount of material and technical resources for the operation;

– Acceptable one allows the rational use of forces and means, resources and compliance with established restrictions and acceptable risk, acceptable level of losses;

– Distinguishable one consists in the presence of characteristic features and its advantages and disadvantages compared to other options;

– Completed one involves full disclosure of the method of conducting the operation in all its components. According to the authors, these criteria are not devoid of subjectivity.

At the same time, the comparison of action options, taking into accounts all possible risks and ways

of reducing them, is widely used in business through the application of the mathematical apparatus of game theory [2]. Game theory is part of a larger theory that studies optimal decision-making processes.

It provides a formal language for describing the processes of making conscious, purposeful decisions involving one or more people (options of action) under conditions of uncertainty and conflict caused by the clash of interests of each option.

The **goal** of the study is to formulate a matrix game based on the analysis of action options to make a decision on planning and organizing a battle in the field of the S-4 section.

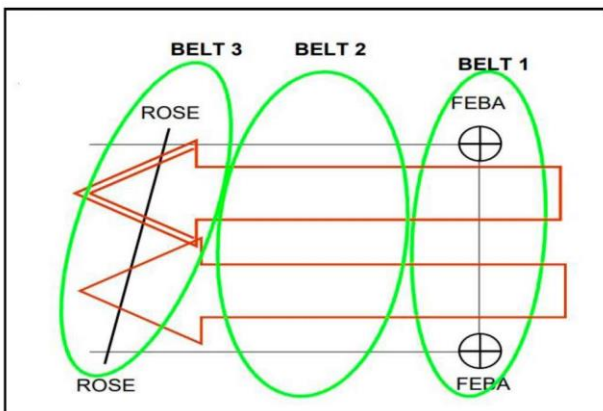
This goal defined the following research **tasks**:

to conduct an analysis of the methods recommended by NATO standards for a military draw;

from the point of view of their viability objectivity assessing to formulate a matrix game based on an a posteriori analysis of action options to make a decision on planning and organizing a battle in the field of S-4 section operation.

## Main material

**1. The analysis of the methods recommended by NATO standards for a military draw from the point of view of the objectivity of assessing their viability.** In the field of the S-4 section operation three methods recommended for military drawing are considered used: the belt method (Fig. 1), the avenue-in-depth method, and the fixed zone method (box). Thus, according to the method of belts, a strip (district) is divided into areas (belts) located in width. It is based on a sequential analysis of events in each belt. This method is based on a consistent analysis of the situation in each zone. In conditions of limited time, the commander can use the advanced belt method. The improved belt method divides the strip (region) of the operation into more than three consecutive belts.



**Fig. 1.** Improved belt method

It is advisable to use this method under the following conditions:

- when actions in one part of the lane (district) affect actions in another part;
- when the terrain is clearly divided into different zones;
- during staged operations;

– when the enemy deploys in clearly defined belts or echelons.

Belts should include:

– the drawing of actions along the entire front and to the full depth of the task (the starting area, the starting line of forcing, the lines of deployment, the line of transition to the attack);

– introduction of a reserve / implementation of a counterattack;

– capture of the object / defeat of the enemy.

As you can see, each course of action is subject to analysis.

**2. Forming a matrix (table) of analysis of options for making a decision.** Comparison of options for action (CA) involves the analysis and evaluation of the advantages and disadvantages of each of them.

Evaluation criteria are indicators used by the headquarters to determine the relative effectiveness and objectivity of one intelligence agency relative to others.

The evaluation criteria developed prior to the draw are reflected in the matrix and are an analytical tool that the staff uses to prepare recommendations to the commander.

The evaluation criteria are chosen by the commander during a tactical meeting (briefing) on the consideration of the CA or a tactical meeting (briefing) on the analysis of the task.

Examples of evaluation criteria for offensive and defensive operations may include:

- performance of the task within the limits of acceptable losses;
- rules of hostilities;
- use of the requirements of the governing documents (battle statutes, guidelines, instructions, etc.);
- intention and instructions of the commander;
- risks.

The elements of such a table are usually certain arguments in favor of a particular course of action. Options for presenting the argument can be verbal (“BMPs operate together with tanks”) or in coded form according to a point or other defined scale. Staff officials can use their own matrix (table) of analysis of CA to make a decision, giving priority to their areas of operation.

An example of the matrix of the analysis of options for actions based on weighting factors is presented in Table 1.

The matrices reflect the evaluation criteria developed before the draw. They are an analytical tool that the staff uses to prepare recommendations to the commander. According to the existing methodology [1], each argument is expressed through the number points, which in ascending order reflects its influence on decision-making.

For further formulation of the problem of choosing the optimal course of action, it is proposed to arrange the elements of the matrix by means of two-dimensional indexing. An example of a generalized matrix (table) of the analysis of action options for decision-making is given in Table 1.

Table 1 – A generalized matrix of analysis of options for making a decision

Evaluation criterion	CA <sub>1</sub>		CA <sub>2</sub>		...	CA <sub>j</sub>		CA <sub>m</sub>	
	Strengths	Weaknesses	Strengths	Weaknesses		Strengths	Weaknesses	Strengths	Weaknesses
Criterion <sub>1</sub>		Argument <sub>11</sub>	Argument <sub>12</sub>		...		Argument <sub>1j</sub>		Argument <sub>1m</sub>
Criterion <sub>2</sub>	Argument <sub>21</sub>			Argument <sub>22</sub>	...	Argument <sub>2j</sub>		Argument <sub>2m</sub>	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Criterion <sub>i</sub>	Argument <sub>i1</sub>			Argument <sub>i2</sub>		Argument <sub>ij</sub>		Argument <sub>im</sub>	
...	...	...	...	...		...	...	...	...
Criterion <sub>n</sub>	Argument <sub>n1</sub>		Argument <sub>n2</sub>			Argument <sub>nj</sub>		Argument <sub>nm</sub>	

At the same time, the selection of the optimal solution based on criteria with weighting coefficients tends to sequential consideration of action options, which in a certain sense reduce its effectiveness. It can be noted that if the set of criteria does not fundamentally affect the decision-making method, then the point evaluation of the arguments makes it possible to reduce the task of choosing the optimal CA to the classic problem of solving game theory.

**3. A matrix game based on action options.** Let us present the analysis matrix of action options as a payment matrix of game theory.

Let *m* options of actions are considered, which correspond to the set of strategies of the first player. Each action option has *n* criteria for evaluating the effectiveness of its strategy.

Arguments in favor of one or another criterion are presented in the form of points that reflect the strengths and weaknesses of each option.

We define the set of criteria by [2], i.e., *m* strategies with a profit  $a_{ij}, \geq 0$  can be applied for each action option, respectively,

$$i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n},$$

which implement the strengths of the action option (the odd columns of Table 1 are expressed by the number of points and will be elements of the payment matrix).

Thus, the payment matrix is formed from the winnings of a conscious player, and the task of finding the best option for action, or a combination of several options for action, is to find the optimal strategy of the first player.

Since the actions of the second player are uncertain for us, we will define this game as a game with nature, and the corresponding evaluation criteria in terms of game theory – as states (strategies) of nature  $\Pi_j, j = \overline{1, m}$ .

Thus, a payment matrix can be formed  $A = \{a_{ij}\}$

( $i = \overline{1, n}, n$  – the number of options evaluation criteria;  $j = \overline{1, m}, m$  – the number of action options) will determine the player's winnings when applying the *j*-th strategy in the state of the *i*-th criterion, the matrix itself will uniquely determine the decision-making situation (conflict situation), and the optimal solution will be recognized through the winning of player A.

In this case, decision-making will consist in choosing some set  $\{x_{ij}^*\}$ , optimal in a certain sense. So, in terms of game theory, this game can be classified as a game with nature with a non-zero sum.

The game matrix or payment matrix will look like this:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}. \tag{1}$$

Similarly, a risk matrix formed as  $R = \{r_{ij}\}$  ( $i = \overline{1, n}$  – the number of options evaluation criteria;  $j = \overline{1, m}, m$  – the number of action options) will determine player A's risk in applying the *j*-*i* strategy in the state of the *i*-th criterion  $\Pi_i$ .

The elements of the mantissa *R* can be determined on the basis of data on the weaknesses of an action (paired columns of Table 2)

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nn} \end{bmatrix}. \tag{2}$$

The authors suggest using Wald's maximin criterion [3], according to which the game with nature is played as a game with an intelligent and aggressive opponent who does everything to prevent us from succeeding. The optimal strategy is considered to be the one in which the profit is guaranteed in any case not less than the specified one. The set of strategies of the first player will be defined as

$$X = \{x_{ij}\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}. \tag{3}$$

Then we will consider the optimal strategy which the average value of the winnings is the maximum:

$$A(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} x_{ij} \Rightarrow \max. \tag{4}$$

And the average risk according to each criterion satisfies the following restrictions:

$$\sum_{j=1}^m r_{ij} x_{ij} \leq r_i^{zad}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \tag{5}$$

here  $n$  – the number of options evaluation criteria;

$m$  – the number of action options.

In this case, the corresponding problem of linear programming is formulated as follows:

To find

$$X^* = \{x_{ij}^*\}$$

maximizes the objective function (4) under restrictions (5).

To get closer to the main theoretical provisions of classical game theory, the value of the risk matrix is proposed to be normalized by rows

$$r'_{i,j} = \frac{r_{i,j}}{\sum_{i=1}^n r_{i,j}}, \quad (6)$$

thereby giving them a sense of probability

$$0 < r'_{i,j} < 1, \quad (7)$$

where

$$i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m} \quad (8)$$

Then the values of marginal risks will be intuitive and will form a column vector

$$R^{3ad} = \begin{bmatrix} r_1^{3ad} \\ \dots \\ r_j^{3ad} \\ \dots \\ r_m^{3ad} \end{bmatrix}, \quad 0 < r_j^{3ad} < 1, \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}. \quad (9)$$

Methods of solving matrix games are known. For example, the problem can be reduced to a linear programming problem [4].

## Conclusions

1. The method of analyzing options for making a decision on combat operations using the mathematical apparatus of game theory is one that is devoid of subjectivity.

2. The solution of the matrix game compiled on the basis of data on combat operations in the sphere of operation of the S-4 headquarters section of the military unit is the basis of the methodology of logistical support for the planning and organization of the battle in the forms and methods of the military management toolkit according to NATO standards.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рекомендації з планування та організації бою за стандартами НАТО [on-line]. – URL: <https://sprotyvg7.com.ua/lesson/rekomendacii-z-planuvannya-ta-organizacii-boyu-za-standartami-nato-chastina-2>
2. Математичні основи теорії вогневих дуелей : монографія / І. О. Кириченко, Л. Г. Раскін. – Харків : Військ. ін-т ВВ МВС України, 2005. – 292 с.
3. Abraham Wald. *Statistical Decision Functions*. – Chelsea Pub Co; 1971. – 179p.
4. Programme 4 you [on-line]. – <https://programforyou.ru/calculators/simplex-method>

## REFERENCES

1. (2022), “Recommendations for planning and organizing a battle according to NATO standards” [on-line]. – URL: <https://sprotyvg7.com.ua/lesson/rekomendacii-z-planuvannya-ta-organizacii-boyu-za-standartami-nato-chastina-2>
2. Ruskin, L and Kyrychenko, I. (2005), *Matematychni osnovy teoriiy vohnevyykh dueley : monohrafiya* [Mathematical foundations of the theory of fire duels: monograph], Troops Institute of the Armed Forces of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, Kharkiv, UA.
3. Wald, A. (1971), *Statistical Decision Functions*, Chelsea Publishing Co, New York City, US.
4. *Programme 4 you* [on-line]. – <https://programforyou.ru/calculators/simplex-method>

Received (Надійшла) 30.08.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.11.2023

## Логістичне супроводження планування та організації бою у формах і методах інструментарію військового менеджменту за стандартами НАТО на основі використання математичного апарату теорії ігор

О. А. Макогон, О. В. Серпухов, Т. В. Рибак, О. В. Терещенко, О. О. Лаврут, В. М. Сухотеplий

**Анотація.** Предметом вивчення в статті є аналіз варіантів прийняття рішення на бойові дії в сфері функціонування секції S-4 штабу військового підрозділу. **Метою статті** є розробка методики військового розіграшу за стандартами НАТО для аналізу варіантів прийняття рішення на бойові дії шляхом застосування математичного апарату теорії ігор. **Завдання дослідження:** Провести аналіз методів, рекомендованих стандартами НАТО для військового розіграшу, з точки зору об'єктивності оцінки їх життєздатності (реалістичності). Сформулювати задачу аналізу варіантів дій для прийняття рішення на планування та організацію бою у сфері функціонування секції S-4 військового підрозділу в термінах теорії ігор. Методологічною основою дослідження стали загальнонаукові та спеціальні **методи** наукового пізнання. **Отримані наступні результати:** З'ясована адекватність математичного апарату теорії ігор для формального опису процесу прийняття рішення на бойові дії з урахуванням усіх можливих ризиків. **Висновки.** Методика аналізу варіантів прийняття рішення на бойові дії за допомогою математичного апарату теорії ігор є такою, що позбавлена суб'єктивності. Розв'язання матричної гри, складеної на основі даних секції S-4 штабу військового підрозділу про результати бойової операції є адекватним запропонованій методиці логістичного супроводження планування та організації бою у формах і методах інструментарію військового менеджменту за стандартами НАТО.

**Ключові слова:** варіанти прийняття рішення, секція S-4 штабу військового штабу, військовий розіграш за стандартами НАТО, матрична гра.

Н. П. Савченко<sup>1</sup>, А. В. Трет'як<sup>2</sup>, О. М. Довгалюк<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

<sup>2</sup>Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

<sup>3</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ МОБІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ЯК ДЖЕРЕЛ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ У ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

**Анотація.** Розглянуті особливості побудови локальних електричних мереж з джерелами розосередженої генерації. Проведено аналіз існуючих мобільних електростанцій. Обґрунтовано застосування мобільних електростанцій у якості джерел розосередженої генерації. Проаналізовані перспективи формування локальної електричної мережі microgrid з обраними типами мобільних електростанцій. Сформовано структуру microgrid мережі з мобільними електростанціями. Визначено умови оптимального керування потоками потужності у локальній електричній мережі.

**Ключові слова:** локальна електрична мережа, мобільна електростанція, джерело розосередженої генерації, споживач, система накопичення енергії, електропостачання.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Сучасна енергетика потребує нових підходів до побудови енергетичних систем. Якщо раніше основним принципом побудови була глобалізація процесів керування генерацією та розподіленням електричної енергії, то на сьогодні більш перспективною є локалізація цих процесів. Такий підхід повністю змінює структуру енергетичної системи, бо її основними елементами стають джерела розосередженої генерації та накопичувачі електричної енергії, які об'єднуються в інтелектуальній Smart Grid системі або у microgrid системі. Така інтелектуалізація локальної електричної мережі дозволяє інтегрувати роботу всіх її елементів задля забезпечення сталого та надійного електропостачання споживачів. Однією з найбільш вагомих проблем запровадження інтелектуальних електричних мереж є визначення оптимального місця підключення розосереджених джерел генерації та аналіз їх впливу на загальну енергосистему. Джерела розосередженого генерування мають низку переваг, тому перспективи їх активного запровадження в енергетичних системах є лише питанням часу. Проте слід зазначити, що не завжди таке впровадження має позитивний ефект при гібридизації із загальною технічно застарілою енергосистемою, саме при нехтуванні принципами оптимальності може бути отриманий значний негативний вплив на параметри усталеного режиму електричних мереж та їх економічні показники [1-3]. Другою не менш важливою проблемою є обґрунтування впровадження, яке базується на визначенні ефективності та надійності роботи таких систем [4-8]. У кожному конкретному випадку має бути проведений аналіз доцільності запровадження, як з технічної точки зору, так і з економічної.

Відповідно задля рішення поставлених вище проблем науковцями здійснюється пошук методів оптимізації режимів електричних мереж з джерелами розосередженої генерації [9-11]. Запропоновані методи надають можливість математично описати та змоделювати роботу електричних мереж з неоднорі-

дною розосередженою генерацією безпосередньо до їх впровадження, а також забезпечують доволі адекватну оцінку їх доцільності у визначеному для підключення місці. Слід зазначити, що усі розглянуті методики застосовується при стаціонарному тобто постійному розташуванні джерел альтернативної енергетики. Проте на сьогодні виникла ситуація, яка потребує негайного вирішення новітніми методами питань, обумовлених постійною небезпекою руйнування енергетичних об'єктів та відповідно пов'язаних з нестабільністю роботи енергосистеми і фактично непередбачуваних об'ємів споживання електричної енергії.

Існуючі дослідження не мають однозначного підходу до оцінки ефективності роботи таких локальних електричних мереж з постійно змінюваними потоками потужності у часі та за величиною.

Рішенням може стати застосування швидкодіючих мобільних електростанцій як джерел розосередженої генерації.

Таким чином, актуальним в умовах бойових дій є питання швидкого поновлення електропостачання інфраструктурних об'єктів на час до повного налагодження централізованого електропостачання.

**Мета дослідження.** Теоретичне дослідження перспектив застосування мобільних електростанцій альтернативної енергетики у якості джерел розосередженої генерації.

### Особливості побудови локальних електричних мереж з джерелами розосередженої генерації

Тенденція розповсюдження альтернативної енергетики призвела до зовсім нових принципів побудови енергосистем. Розвиток напряму розосередженої генерації та локалізації керування режимами електричних мереж останнім часом знаходиться на новому витку технічного прогресу в енергетичній галузі. Перебудова енергосистем веде до повної децентралізації електропостачання споживачів. Загальна структура новітніх енергосистем на сьогодні має вигляд, наведений на рис. 1 [12].



Рис. 1. Електричні мережі децентралізованої енергосистеми [12]

Оптимізація і відповідно підвищення ефективності роботи електричних мереж децентралізованої енергетичної системи повністю залежить від методів розподілення навантаження між генеруючими об'єктами та зниження втрат потужності при передачі від них до споживача. При цьому слід враховувати необхідність керування потоками енергії у системі.

Таким чином, можна констатувати, що інтелектуалізація локальних мереж і принцип керування «з нижніх рівнів системи електропостачання до вищих» – це майбутнє енергетичних систем.

Принципи реалізації інтелектуальних електричних мереж вимагають впровадження вдосконалених автоматизованих систем моніторингу, керування та захисту, що виключають вплив людського фактору на їх роботу. Така оптимізація керування енергосистемою знижує ймовірність виникнення аварійних режимів роботи та підвищує її надійність.

Перехід на технології Smart Grid в енергетиці потребує постійного розвитку та впровадження сучасних засобів підтримки балансу між генерацією і споживанням електроенергії на базі сучасних інформаційних і телекомунікаційних технологій, а також впровадження засобів контрольованого перетворення електроенергії [13].

Цікавим, з практичної точки зору, є прояв Smart Grid у вигляді так званих мікромереж (microgrid). Фактично microgrid представляє собою групу джерел і споживачів електроенергії, яка підключена до традиційної електромережі, але може за потреби функціонувати автономно [13]. Особливим і дуже важливим напрямом розвитку локальних електричних мереж Smart Grid є впровадження систем накопичення енергії. Вони можуть бути побудовані за різними технологіями та виступати як додаткові джерела генерації в час пікового споживання електроенергії, що дозволить дотримуватися економічних режимів роботи усіх видів електростанцій наявних в енергосистемі. Таким чином, побудова енергетичних систем, що базуються на принципах інтелектуалізації мереж, повинні мати у своєму складі наступні компоненти:

- 1) джерела традиційної та альтернативної розосередженої генерації;
- 2) системи накопичення електроенергії;
- 3) автоматизовану систему керування, моніторингу та захисту, побудовану на базі сучасних мікропроцесорних технологій.

## Принципи формування локальної електричної мережі microgrid з мобільними електростанціями

Мобільні електростанції мають досить широкий діапазон потужностей і фактично основним їх призначенням є забезпечення електропостачання у кризових ситуаціях, коли не має можливості підключення до загальної електромережі. Втім таке обмеження є недоцільним, бо можливості мобільних електростанцій значно ширші і повинні бути використані повною мірою.

Повна класифікація мобільних електростанцій, наведена на рис. 2, дає уявлення щодо визначення повного спектру можливостей їх застосування.

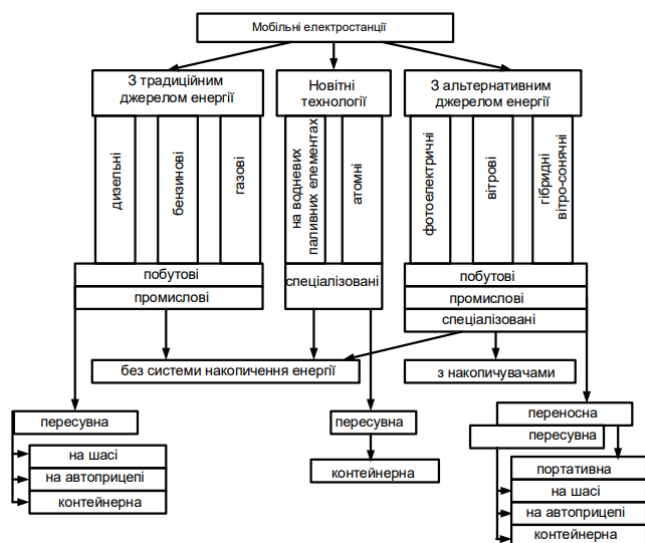


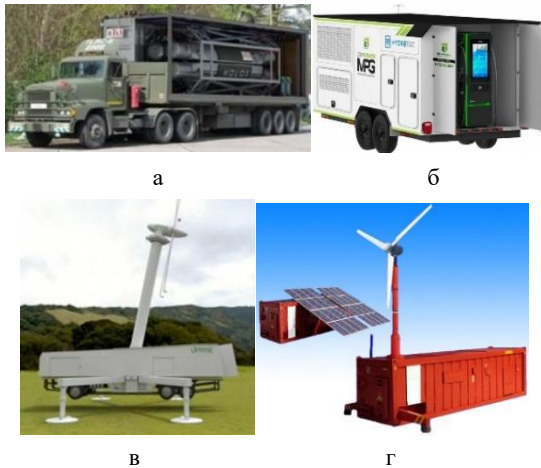
Рис. 2. Класифікація мобільних електростанцій [14]

Широка номенклатура мобільних електричних станцій, що наведена на рис. 2, дає можливість задовільнити вимоги як побутових, так і промислових споживачів. Особливої уваги заслуговують потужні електростанції, побудовані за новітніми технологіями та з альтернативними джерелами енергії, бо вони можуть бути використані як джерела розосередженої генерації, а їх мобільність дозволить швидко вирішувати усі питання з електропостачанням у будь-якій точці локальної електричної мережі, а також підвищить надійність та ефективність роботи такої



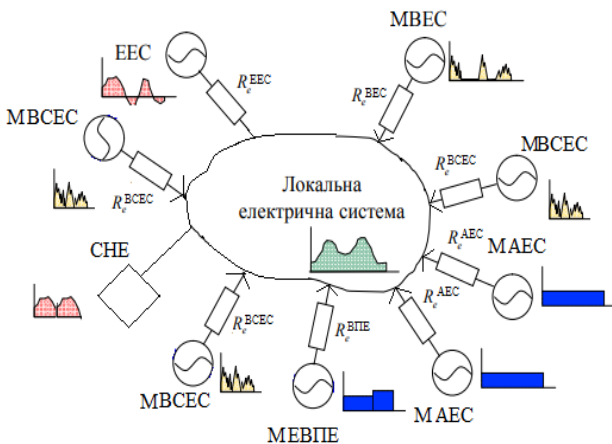
мережі за рахунок її розвантаження та керування потоками електричної енергії. Також слід зазначити, що ці види електростанцій не впливають на навколишнє середовище. Більш доцільним буде застосування таких електростанцій у розподільчих мережах низької напруги до 1000 В. Безпосереднє встановлення мобільних електростанцій поблизу споживачів сприятиме зниженню рівня втрат електроенергії, що виникають при її передачі.

Найкращі рішення мобільних електростанцій, що можуть бути застосовані у якості джерел розосередженої генерації, наведені на рис. 3.



**Рис. 3.** Мобільні електростанції: а – атомна; б – на водневих паливних елементах; в – вітрова; г – гібридна вітро-сонячна

Наведені на рис. 3 конструкції мобільних електростанцій можуть бути оснащені системами зберігання енергії, що підвищують їх надійність та енергоефективність. Загальна структура локальної електричної мережі microgrid з мобільними електростанціями наведена на рис.4.



**Рис. 4.** Структура microgrid з мобільними електростанціями

Структура такої електричної мережі microgrid може мати різні конфігурації і підключення мобільних електростанцій може здійснюватися або безпосередньо до окремого споживача, або на шини низької напруги трансформаторної підстанції. Представлена на рис. 4 локальна електрична мережа microgrid є особливо ефективною в умовах забезпечення на-

дійного електропостачання об'єктів критичної інфраструктури.

Рівномірний графік генерації забезпечують мобільні атомні електростанції (МАЕС), але вартість таких електростанцій та небезпечність ускладнюють їх запровадження [15].

Мобільні електростанції на водневих паливних елементах (МВВПЕ) мають можливість швидко розвивати саме ту потужність, яка потрібна споживачу в той чи інший момент часу, і вони безпечні для навколишнього середовища, але їх виробництво ще не набуло масовості [16].

Мобільні вітрові (МВЕС) і вітро-сонячні (МВЕСЕС) електростанції мають найбільше розповсюдження та мають перевірнену технологію реалізації, тому саме вони можуть зайняти перше місце у запровадженні в локальній електричній мережі microgrid.

Система накопичення електричної енергії (СНЕ) може бути вбудованою безпосередньо у складі мобільної електростанції або окремим блоком під'єднана до локальної електричної мережі. У разі якщо система накопичення має стаціонарне підключення, то у цьому випадку її розташування буде доцільним якнайближче до підстанції енергосистеми задля зменшення втрат електричної енергії.

Баланс між генерацією і споживанням електроенергії у наведеній на рис.4 системі можна представити виразом:

$$P_{СПОЖ} = P_{ЕЕС} + \sum P_{МЕС} \pm P_{СНЕ}, \quad (1)$$

де  $P_{СПОЖ}$  - потужність споживачів;  $P_{ЕЕС}$  - потужність, отримана з енергосистеми;  $\sum P_{МЕС}$  - потужність підключених мобільних електростанцій, значення якої визначається наступним чином:

$$\sum P_{МЕС} = n_1 P_{МВЕС} + n_2 P_{МАЕС} + n_3 P_{МВЕСЕС} + n_4 P_{МВВПЕ}, \quad (2)$$

де  $P_{СНЕ}$  - потужність систем накопичення енергії;  $n_1, n_2, n_3, n_4$  - кількість підключених мобільних електростанцій відповідно за видами;  $P_{МВЕС}$  - потужність МВЕС;  $P_{МАЕС}$  - потужність МАЕС;  $P_{МВЕСЕС}$  - потужність МВЕСЕС;  $P_{МВВПЕ}$  - потужність МВВПЕ.

У години мінімального споживання баланс системи має вигляд:

$$\begin{cases} P_{СПОЖ} = P_{ЕЕС} - P_{СНЕ}, & \text{при } P_{СНЕ} \leq 0,3P_{НЕ} \\ P_{СПОЖ} = P_{ЕЕС} + P_{СНЕ}, & \text{при } P_{СНЕ} \geq 0,95P_{НЕ} \end{cases}, \quad (3)$$

де  $P_{НЕ}$  - повна потужність накопичувачів електричної енергії; при автономному режимі роботи локальної мережі:

$$P_{СПОЖ} = \sum P_{МЕС} \pm P_{СНЕ}. \quad (4)$$

Таким чином, інтелектуальне керування потоками потужності у локальній електричній мережі microgrid з мобільними електростанціями відбувається фактично за умовами виконання рівнянь (1) - (4).

Критерієм оптимальності роботи мобільних електростанцій в локальній енергосистемі може бути мінімум електроенергії, яка споживається з енергосистеми.

### Висновки

Проведено аналіз принципів побудови локальних електричних мереж з джерелами розосередженої генерації. Проаналізовані типи існуючих мобіль-

них електростанцій та перспектив їх застосування у якості джерел розосередженої генерації, а також наведено структуру microgrid з мобільними електростанціями. Визначено умови оптимального керування локальною електричною мережею microgrid. Отримані результати теоретичного дослідження є основою для подальшого проведення моделювання процесів у наведеній структурі microgrid.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гончаренко І. С. Окремі питання підвищення ефективності методу розв'язання задачі визначення оптимальних місць встановлення та потужності розосередженої генерації / І. С. Гончаренко // Праці Інституту електродинаміки Національної академії Наук України. – 2015. – № 42. – С. 47-51.
2. Савватєєв А. Методика прийняття рішень на основі нечіткої логіки для визначення оптимального місця підключення розосереджених джерел генерації. *Актуальні наукові дослідження в сучасному світі*. 2018. № 1 (7(39)). С.122-129.
3. Кузьмич О. В. Аналіз впливу розосередженого генерування на режим роботи розподільних електричних мереж / О. В. Кузьмич, В. О. Комає // Вісник НТУУ «КПІ». – 2014. – № 25. – С.108-113.
4. Лежнюк П. Д. Вплив розосередженого генерування на надійність роботи електричних мереж / П. Д. Лежнюк, В. О. Комає, С. В. Кравчук, І. В. Котилко // Вісник НТУ «ХП»: "Нові рішення в сучасних технологіях". – 2018. – № 45(1321). – С.25-31.
5. Зайцев С. О. Підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи електричних мереж та електроустаткування / С. О. Зайцев, В. В. Кучанський, І. О. Гунько // GrailofScience. – 2021. – №5. – С.144-152.
6. Shevchenko S. Comparative Analysis of Energy Efficiency of Geometric Constructions Solar Low-Power Plants / S. Shevchenko, N. Savchenko and others // 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology, Kharkiv, 2023, pp. 1-6.
7. Savchenko N. Improving the Energy Efficiency of Small Hydropower Plants by Connecting an Energy Saving System with Kinetic Energy Storage / N. Savchenko, O. Dovgalyuk, A. Tretiak, T. Syromyatnikova // 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1-6.
8. Abdeerahim F. A. Analysis of electricity network modes with renewable energy sources / F. A. Abdeerahim, O. M. Dovgalyuk, M. M. Samy / Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EES-2021)». - Харків : «Друкарня Мадрид». - 2021. – С. 10-11.
9. Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 174 с.
10. Журахівський А. В. Оптимізація режимів електроенергетичних систем : навч. посіб. / А. В. Журахівський, А. Я. Яцейко. – 2-ге вид., випр. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2010. – 140 с.
11. Dovgalyuk O. Optimisation of Operating Modes of Distribution Electric Networks in Ukraine / O. Dovgalyuk, N. Savchenko and others // 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2023, pp. 1-6.
12. Nadeem T. B. Distributed energy systems: A review of classification, technologies, applications, and policies / T. B. Nadeem, M. Siddiqui, M. Khalid, M. Asif // Energy Strategy Reviews. – 2023. – No. 48. – P. 1–23.
13. Power grids will become “smart” home page [Electronic resource] // Power grids will become “smart” home page. – Mode of access: <https://ua-energy.org/en/posts/13-01-2021-64d17276-10c7-4863-89d0-ca2367ad58ce>
14. Савченко Н. П. Аналіз ефективності застосування мобільних автономних електростанцій в умовах критичного стану енергетичної інфраструктури. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика»*. 2022. №2(27). С.15-19.
15. Saukh S. Mathematical Model of a Local Grid with Small Modular Reactor NPPs / S. Saukh, A. Borysenko // Ядерна та радіаційна безпека. – 2022. – №2(94). – P.44-52.
16. Михайлів М. І. Створення локальних джерел електроенергії на базі паливних комірок / М. І. Михайлів, П. В. Савуляк // Нафтогазова енергетика. – 2012. – №1(17). – С.101-112.

Received (Надійшла) 19.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.11.2023

### Perspectives of application of mobile power plants as sources of distributed generation in local electrical networks

Natalia Savchenko, Andrii Tretiak, Oksana Dovgalyuk

**Abstract.** The article considers the peculiarities of building local electric networks with sources of distributed generation, which are one of the most priority links for the development of modern energy systems. In such systems, sources of distributed generation and electric energy storage are combined in an intelligent Smart Grid system or microgrid system. The intellectualisation of the local electric network allows to integrate the work of all its elements to ensure sustainable and reliable power supply to consumers. An analysis of existing mobile power plants was carried out to identify the possibilities of their use as sources of distributed generation. Based on the analysis, it is found that mobile power plants built on the basis of the latest technologies or renewable energy technologies have the best prospects for implementation as such sources. A general structure for the formation of a local microgrid with selected types of mobile power plants is proposed, which can have different configurations, with mobile power plants being connected either directly to an individual consumer or to the low voltage buses of a transformer substation. The presented microgrid is particularly effective in ensuring reliable power supply to critical infrastructure facilities. The conditions for optimal control of power flows in a local electric network are determined. The transition to Smart Grid and microgrid technologies in the energy sector requires continuous development and implementation of modern means of maintaining the balance between electricity generation and consumption based on modern information and telecommunication technologies, as well as the introduction of controlled power conversion. The peculiarity of the microgrid system is that it can function autonomously if necessary. The obtained results of the theoretical study are the basis for further modelling of processes in the given microgrid structure.

**Keywords:** local electric network, mobile power station, source of distributed generation, consumer, energy storage system, power supply.

Dmytro Vlasenkov<sup>1</sup>, Rauf Allakhveranov<sup>2</sup>, Mykola Starodubcev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kryvyi Rih Professional College of National Aviation University, Kryvyi Rih, Ukraine

<sup>2</sup> Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

## OPERATIONAL CONTROL OF PRODUCTION PROCESSES UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY

**Abstract.** the task of developing models for adaptive technological processes control in small-scale, multi-item production is relevant. The task of operational control of technological processes production under conditions of uncertainty is formulated as a task of trajectory control. The model of phase-trajectory control of technological processes of manufacturing new equipment products has been developed, which allows adjusting the modes of technological processes depending on the current state of the technological object. Using the control model allows you to expand the tolerances on the parameters of the starting materials and optimally assign technological modes of manufacturing of products. A model of phase-trajectory control has been developed, which is adaptive to changes in operating conditions and process characteristics and works in a priori insufficiency and/or fuzzy information.

**Keywords:** control model, phase-trajectory control, technological process, technological modes, technological object, uncertainty of conditions.

### Introduction

Currently, there is a growing trend towards the transition to small-scale, multi-number production. The manufacture of products in small batches with a wide range of sizes and properties leads to an increase in the frequency of changing settings (parameters of technological operations, equipment operating modes), and increased requirements for the flexibility of the settings model.

At the same time, the model has to be developed on the basis of a limited amount of noisy experimental data and very vague a priori information about the statistical characteristics of the added disturbances. In many cases, these difficulties are exacerbated by the presence of drift in the ME characteristics.

Automated TP control systems, most of which are based on statistical models, are ineffective during the development of new products. Statistical models are by their nature very sensitive to changes in experimental conditions, and their adequacy can only be guaranteed under the conditions under which they were built.

As a result, the process engineer is usually deprived of ACSTP support and spends considerable time selecting modes for manufacturing pilot batches and collecting statistical data at the most critical time - the moment of mastering new processes. Existing ACSTP options are mostly only able to maintain the level achieved by the technologist.

Thus, the task of developing models for adaptive TP control in small-scale, multi-item production is relevant.

### Presentation of the main material

In order to reduce the time required for the development and introduction of new products, it is necessary to create a decision-making model at the design stage, which will be adjusted and supplemented during the TP debugging process and concentrate the experience of manufacturing a particular product. The model should contain and clarify the requirements for the basic TP, provide the calculation of process control during the manufacture of the product, and work in

conditions of a limited amount of noisy experimental data. The proposed approach allows taking into account these requirements for the decision-making model.

In the context of small-scale, multi-nomenclature production, the sources of uncertainty that complicate the choice of a particular control option are the following factors

- Insufficient amount of available information that does not allow the use of statistical methods for technology development;

- inability to accurately determine the phase coordinates (for example, with group processing methods common in instrumentation, the determination of the average value of the parameter for the entire batch of products is only of an estimation nature);

- the impossibility of absolutely accurate implementation of the selected control on shop equipment.

We will consider the technological process as a multi-stage system with a sequential transition from one state to another along a certain trajectory.

In this regard, the development of algorithms for optimal process control should be considered as a single procedure for end-to-end design [1].

The task of developing a TP control model is formulated as follows: for the initial states of the manufacturing object, which are determined at the control operation, and the states measured at the intermediate control, it is necessary to select the control  $u_i (i=0, \dots, N-1)$ , i.e. TP modes, so that the output characteristics of the product minimally differ from the target ones.

Model development begins with an assessment of the possibility of using the modes of the basic technology for the device being manufactured. The choice of the basic technology means that the sequence of controlled operations is set and the restrictions on the control variables are determined.

The choice of an analog, i.e., a device that is closest to the designed one in terms of its characteristics and implemented on this basic technology, determines the initial state constraints that can be revised in the future. It

should be noted that this problem only formally coincides with the traditional optimal control problem. The difference is that in the traditional control problem, the values of the initial phase coordinates are known to within the measurement error, while in the synthesis problem, the initial values of the phase coordinates are not known in advance, since the values of the output parameters can randomly take values from the permissible range. This, in turn, leads to an error in the choice of control.

The problem belongs to the class of multi-step problems, where information about the process and its control are carried out at discrete points in time. In modern control theory [2], this problem is usually solved by dynamic programming in two stages:

- construction of an optimal trajectory;
- synthesis of the control that realizes the trajectory.

The possibility of separating the stages is based on the assumption that the disturbances affecting the process are small.

Given that in practice, manufacturers always strive to expand tolerances on the initial parameters of materials, the assumption of small perturbations becomes unjustified, and the construction of a single optimal trajectory is impractical.

The presence of a single trajectory, i.e., the use of fixed modes, requires tighter tolerances on the initial materials, which supplier plants are often unable to meet. Despite the constant improvement of the properties of the starting materials, the improvement of methods and means of controlling their parameters, the production of new equipment products usually has heterogeneous characteristics of objects, especially in TP groups.

Under these conditions, the technologist is forced to either increase rejects due to workpieces that do not fall within the zone of an acceptable fixed mode or to proceed to mode correction. In general, mode correction allows to expand the tolerance for the parameters of the starting materials, since by selecting modes and correcting them, it is possible to bring the process, which deviated from the calculated trajectory in previous operations, within the target interval.

In this regard, at the stage of TP development, it is advisable to set the extreme problem as a phase-trajectory control problem [3, 4]. And only after the developer is convinced that the production of devices with the required properties is possible for a wide range of initial states and operating modes, it is possible to set the task of process optimization in terms of production cycle time, cost, etc. using standard and heuristic optimization methods to solve it.

The description of a multistage decision-making problem is based on the fuzzy mapping  $f: X \times U \rightarrow X$ , where  $X$  is the space of states,  $U$  is the space of strategies (control sequences that move an object from an initial state to a final state).

Any state, including the initial and final states, is represented by a convex fuzzy subset. Thus, the basic TP is determined by the sequential transition from one fuzzy state to another

$$X_0 \rightarrow X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow \dots \rightarrow X_N.$$

The  $X_k$  state is determined by the vector of controlled parameters  $\{x_j\}_{j=1}^{L_k}$  at the  $k$ -th TP stage.

The control model at the  $k$ -th stage of TP is built on the basis of the method of forming a maintenance control model. According to this method, the set of experimental data by design parameters is divided into  $n_k$  fuzzy clusters corresponding to  $n_k$  possible TP modes at the  $k$ -th stage.

The fuzzification procedure works even when the amount of experimental data is less than the number of clusters. However, in the case of extremely limited data on design parameters and the availability of control data, the following approach can be applied.

Using the TP model in the state space [5–8], we form fuzzy relations in the  $X \times U \times X$  space, which is a formalized representation of control strategies and is characterized by fuzzy relationship matrices  $R_k$ , such that

$$X_{k+1} = R_k \circ X_k,$$

where  $\circ$  – the operation of the maximum product.

Such a representation is adaptive to changes in design parameters, the structure of the controlled object, and changes in TP modes. For  $n_k$  possible TP modes at the  $k$ -th stage, we build a set of  $\{R_{k,i}\}_{i=1}^{n_k}$ ,

$k = 0, \dots, N - 1$ , for which the:

$$X_{k+1,i} = R_{k,i} \circ X_k.$$

By "backtracking" the obtained solution, starting from  $X_N$ , we determine the sets  $\{X_{k,i}\}_{i=1}^{n_k}$  of admissible states of the system at each stage:

$$X_{k,i} = R_{k,i}^{-1} \circ X_{k+1}.$$

where  $R_{k,i}^{-1}$  – is the opposite of  $R_{k,i}$ .

Let  $\mu_x$  – physical indicator of a  $X_{k,i}$  fuzzy state. Technological restrictions on design parameters are also set by the corresponding  $\mu_c$  PI. Then a permissible solution  $D_{k,i}$  at the  $k$ -th stage can be defined as follows:

$$\mu_D = \mu_x * \mu_c,$$

where  $*$  – some binary operation, the specific type of which is determined based on the characteristics of TP.

A permissible solution  $D_{k,i}$  ensures that the required values of the output parameters are obtained by redistributing the design and technological stocks. Thus, instead of a single trajectory, we get a set of admissible trajectories

$$\begin{aligned} & \{D_{0,i} | R_{0,i}\}_{i=1}^{n_0} \rightarrow \{D_{1,i} | R_{1,i}\}_{i=1}^{n_1} \rightarrow \dots \\ & \rightarrow \{D_{k,i} | R_{k,i}\}_{i=1}^{n_k} \rightarrow \dots \rightarrow X_N. \end{aligned}$$

Suppose that at the  $k$ -th stage of TP, the real state of the system is determined by a fuzzy set  $Y_k$  with the corresponding PI  $\mu_Y$ . The control algorithm consists in determining the closest possible trajectory to the state  $Y_k$  and developing the corresponding control influence.

The relative distance between two fuzzy sets, for example, the Hamming distance (linear), can be used as a measure of proximity [9–12]:

$$\delta(Y_k, D_{k,i}) = \frac{1}{L_k} \sum_{j=1}^{L_k} |\mu_Y(x_j) - \mu_D(x_j)|,$$

or Euclidean distance (quadratic):

$$e(Y_k, D_{k,i}) = \frac{1}{L_k} \sqrt{\sum_{j=1}^{L_k} (\mu_Y(x_j) - \mu_D(x_j))^2},$$

$$0 \leq \delta, e \leq 1.$$

We define a permissible solution  $D_{k,i}^*$  from the condition  $\min d(Y_k, D_{k,i})$ ,  $i = 1, \dots, n_k$ , where  $\delta$  or  $e$  can be taken as the relative distance  $d$  between  $\mu_Y$  and  $\mu_D$ . As an optimal control, we choose the control defined by the fuzzy relation  $R_{k,i}^*$ , corresponding to  $D_{k,i}^*$ .

The proposed model for building a family of trajectories allows us to control TP in real time. If the base trajectory is known, and for some reason (external disturbances) the state of the system turned out to be different from the expected one, a new trajectory is selected that will bring our system to the goal or its vicinity. The control algorithm is reduced to a step-by-step correction of TP modes by minimizing the difference

between the current state and the acceptable solution at this stage.

A feature of the proposed model of phase-trajectory control of TP is the fundamental possibility of designing control strategies for several potentially possible groups of products at once, which makes it possible to identify common process stages for all groups in conditions of multi-nomenclature production.

The use of the model makes it possible to reduce the number of controls developed, as well as to decide on the feasibility of adjusting the modes of certain operations.

## Conclusions

The task of operational control of TP production under conditions of uncertainty is formulated as a task of trajectory control.

A model of phase-trajectory control of TP designed to select and adjust technological modes depending on the current state of the controlled equipment has been developed.

## REFERENCES

1. Невлюдов І.Ш. Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації. Частина 1: Підручник. Харків: ФОП Панов А.М., 2021. 604 с.
2. Ладанюк А.П., Луцька Н.М., Кишенько В.Д. Методи сучасної теорії управління. Київ: Ліра-К, 2018. 368 с.
3. Бодянский Е.В., Кучеренко Е.И., Михалев А.И., Филатов В.А., Гасик М.М., Куцин В.С. Интеллектуальное управление технологическими процессами: монография. Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины, 2013. 213 с.
4. Павленко П. М. Автоматизовані системи технологічної підготовки розширених виробництв. Методи побудови та управління: Монографія. К.: Книжкове вид-во НАУ, 2005. 280 с.
5. Герасимов О.І. Фізика складних нерівноважних систем та процесів: монографія. Одеса : Одеський державний екологічний університет, 2022. 187 с.
6. Дубовой В.М., Кветний Р.Н., Михальов О.І., Усов А.В. Моделювання та оптимізація систем : підручник Вінниця : ПП «ТД«Едельвейс», 2017. 804 с.
7. Datsenko, S. and Kuchuk, H. (2023), "Biometric authentication utilizing convolutional neural networks", *Advanced Information Systems*, Vol. 7, no. 2, pp. 87–91, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.2.12>
8. Poroshenko, A. and Kovalenko, A. (2023), "Optimization of a basic network in audio analytics systems", *Advanced Information Systems*, Vol. 7, no. 1, pp. 23–28, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.1.04>
9. Petrovska, I. and Kuchuk, H. (2023), "Adaptive resource allocation method for data processing and security in cloud environment", *Advanced Information Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 67–73, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.10>
10. Dun, B., Zakovorotnyi, O. and Kuchuk, N. (2023), "Generating currency exchange rate data based on Quant-Gan model", *Advanced Information Systems*, Vol. 7, no. 2, pp. 68–74, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.2.10>
11. Желдак Т.А., Коряшкіна Л.С., Ус С.А. Нечіткі множини в системах управління та прийняття рішень: за редакцією С.А. Ус ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2020. 387 с.
12. Раскін Л. Г., Сіра О. В., Кожевников Г. К. Методи аналізу систем і прийняття рішень в умовах невизначеності: підручник. Харків : Факт, 2023. 256 с.

Received (Надійшла) 04.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.11.2023

## Оперативне управління технологічними процесами виробництва в умовах невизначеності

Д. П. Власенков, Р. Ю. Аллахверанов, М. Г. Стародубцев

**Анотація.** Актуальною є задача розробки моделей адаптивного керування технологічним процесом у дрібносерійному багатонаменклатурному виробництві. Задача оперативного керування виробництвом технологічного процесу в умовах невизначеності сформульована як задача траєкторного керування. Розроблено модель фазово-траєкторного управління технологічного процесу виробництва виробів нової техніки, що дозволяє коригувати режими ТР залежно від поточного стану технологічного об'єкта. Використання моделі управління дозволяє розширити допуски на параметри вихідних матеріалів і оптимальним чином призначити технологічні режими виготовлення виробів. Розроблена модель фазово-траєкторного управління, адаптивна до зміни умов функціонування та характеристик процесу і працює при апріорній недостатності та/або нечіткості інформації.

**Ключові слова:** модель управління, фазово-траєкторне управління, технологічний процес, технологічні режими, технологічний об'єкт, невизначеність умов.

С. Ю. Гавриленко, В. О. Полторацький

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

## МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ОПЕРАТИВНОСТІ КЛАСИФІКАЦІЇ ДАНИХ ЗА РАХУНОК ЗМЕНШЕННЯ КОРЕЛЯЦІЇ ОЗНАК

**Анотація.** *Об'єктом* дослідження є процес ідентифікації стану комп'ютерної мережі. *Предметом* дослідження є методи ідентифікації стану комп'ютерних мереж. *Метою* статті є підвищення оперативності виявлення вторгнень у комп'ютерні мережі за рахунок зменшення кореляції ознак. *Методи, що використовуються:* методи штучного інтелекту, машинного навчання, методи зменшення кореляції ознак. *Отримано такі результати:* Досліджено ефективність використання підходів, які зменшують кореляцію даних: метод головних компонентів (PCA), незалежних компонентів (ICA), L1 та L2 регуляризацію, обгрунтовано метод для подальшого дослідження. За результатами досліджень запропоновано спеціальну процедуру зменшення кореляції вихідних даних. Для оцінки якості та оперативності запропонованої процедури, розроблено програмні моделі на основі: Gradient Boosting, Random Forest, повнозв'язної нейронної мережі (FCNN) та згортової нейронної мережі (CNN). У якості вихідних даних використано набір UNSW-NB 15, який містить інформацію про нормальне функціонування мережі та під час вторгнень. Виконано порівняльний аналіз якості та оперативності розроблених моделей. *Висновки.* Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробці методу виявлення вторгнень в комп'ютерні мережі, який відрізняється від відомих наявністю спеціальної процедури зменшення кореляції вихідних даних, що дозволило підвищити оперативність процесу ідентифікації.

**Ключові слова:** машинне навчання, класифікація даних, попередня обробка даних, кореляція даних, комп'ютерна мережі, нейронні мережі, ансамблеві класифікатори, системи виявлення вторгнень.

### Вступ

На сьогодні, виявлення вторгнень в комп'ютерні системи та мережі є одним із пріоритетних завдань та потребує удосконалення та розробки нових методів. Одним із важливих кроків побудови моделі виявлення вторгнень є етап попередньої обробки даних. Важливою складовою цього етапу є виявлення ознак, які корелюють між собою.

Наявність корелюючих ознак негативно впливає на якість моделі, оскільки дані містять надмірну інформацію. Це призводить до того, що модель враховує ту саму інформацію кілька разів, що робить її менш ефективною і менш інтерпретованою. Корельовані ознаки роблять також модель менш стійкою і більш чутливою до шуму в даних. Зміна значень однієї ознаки може призвести до неправильних висновків щодо впливу на цільову змінну через кореляцію з іншою ознакою. Крім того, коли ознаки сильно корелюють, стає складніше інтерпретувати вплив кожної ознаки на цільову змінну. Це може бути проблемою у випадках, коли важливо зрозуміти, саме які ознаки впливають на передбачення моделі. Наявність кореляції в даних може призвести до проблеми мультиколінеарності, коли матриця ознак стає близькою до сингулярної або незворотної. Це може ускладнити навчання лінійних моделей, оскільки вони стають нестійкими. Також корельовані ознаки збільшують складність моделі, підвищують час навчання моделі, без суттєвого покращення її продуктивності. Це може призвести до перенавчання, особливо у випадках, коли даних мало.

*Об'єктом дослідження* є процес ідентифікації стану комп'ютерної мережі.

*Предметом дослідження* є методи ідентифікації стану комп'ютерних мереж.

### Постановка проблеми та огляд наукових публікацій

Кореляція між ознаками оцінюється з використанням різних статистичних метрик та методів. Найбільш поширені способи оцінки кореляції ознак включають:

– коефіцієнт кореляції Пірсона

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(x, y)}{\sqrt{S_x^2 S_y^2}},$$

де  $\bar{x}, \bar{y}$  – вибіркові середні  $x^m, y^m$ ,  $S_x^2, S_y^2$  – вибіркові дисперсії,  $r_{xy} \in [-1, 1]$ .

– коефіцієнт кореляції Спірмена

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum (x_i - y_i)^2}{N(N^2 - 1)},$$

де  $x_i - y_i$  – різниця між спряженими значеннями рангів змінних  $x$  і  $y$ .

На відміну від коефіцієнта Пірсона, який вимірює лінійний зв'язок, коефіцієнт Спірмена може виявляти інші типи зв'язку, наприклад, монотонний нелінійний зв'язок.

Для боротьби з проблемою кореляції ознак, використовують:

– видалення однієї з корелюючих ознак;

– застосування методів відбору ознак, таких як, взаємна інформація (mutual information)[1,2] або використання моделей, що дозволяють оцінити інформативність ознак [3-5];

– перетворення ознак, наприклад, використання методу головних компонентів (Principal Component Analysis, PCA)[6] або методу незалежних компонентів (Independent Component Analysis, ICA)[7].

– Використання регуляризації (у разі лінійних моделей), наприклад, L1 або L2 регуляризація, щоб стримувати вплив кореляційних ознак[8].

Разом із тим, видалення або трансформація корелюючих ознак може призвести до погіршення якості моделі з кількох причин. Корелюючі ознаки можуть містити корисну інформацію щодо залежності між змінними. При видаленні однієї з них, модель втрачає доступ до цієї інформації та може стати менш інформативною.

Крім того, ознака, яка корелює, може мати високу інформативність і її видалення вплине на якість моделі. Модель може стати менш здатною до виявлення та врахування залежності у даних, що знижує точність та здатність моделі до передбачення цільової змінної. Видалення корелюючих ознак може зменшити мультиколінеарність, що у деяких випадках призводить до перенавчання моделі, особливо якщо ознака, що видаляється, містить важливу інформацію для моделювання. Також видалення ознак, які корелюють, зазвичай, ускладнює інтерпретацію моделі та пояснення результатів.

Щоб вирішити, дане протиріччя, потрібно оцінити, як видалення ознак, що корелюють, впливає на якість, оперативність та інтерпретованість моделі. У деяких випадках це може бути корисним для поліпшення продуктивності моделі, а в інших – може негативно вплинути на її здатність робити точні прогнози.

На сьогодні, найбільш популярними методами трансформації даних, які корелюють є: регуляризація, метод головних компонентів (PCA)[9], метод незалежних компонентів (ICA).

Регуляризація, може зробити модель більш простою та менш гнучкою. Це може бути небажаним, якщо дані мають складні взаємозв'язки, які модель має враховувати. Занадто сильна регуляризація, спрямована на зменшення кореляції та може призвести до недонавчання моделі, особливо якщо дані мають суттєві залежності між ознаками. Крім того, визначення оптимального рівня регуляризації для зменшення кореляції може бути складним завданням. Неправильний вибір параметрів регулювання може призвести до небажаних ефектів.

Метод незалежних компонентів передбачає, що приховані компоненти є статистично незалежними та мають безперервні розподіли. Однак у реальних даних може бути безліч винятків із цього припущення. Крім того, якщо дані містять складні нелінійні залежності, ICA може працювати менш ефективно. Визначення правильної кількості прихованих компонентів у методі ICA також є складним завданням. Неправильно вибрана кількість компонентів може призвести до втрати інформації або небажаних ефектів. Метод чутливий до шуму даних.

Метод головних компонентів також може бути неефективним для даних із нелінійними залежностями між ознаками та потребує масштабування даних. PCA чутливий до викидів у даних, тому при використанні цього методу необхідно проаналізувати дані та видалити викиди. Незважаючи на ці обмеження, PCA є ефективним інструментом для

зменшення розмірності та зменшення кореляції даних, особливо для даних із лінійною залежністю між ознаками.

При виборі методу, важливо враховувати його обмеження та вибирати метод залежно від характеристик даних та мети аналізу. Для подальшого дослідження обрано метод головних компонент, якому передувє етап попередньої обробки даних.

Метод головних компонент (Principal Component Analysis, PCA) виконує проєкцію даних у новий набір змінних, які називаються головними компонентами[10], зберігаючи, при цьому, найбільшу кількість інформації, зменшує розмірність даних та прибирає кореляцію між ознаками.

Метод PCA працює так:

Крок 1. Виконується стандартизація ознак (середнє значення ознаки зводиться до нуля, стандартне відхилення – до одиниці)

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \bar{y}_j}{s_j}, i = 1, n; j = 1, m,$$

де  $y_{ij}$  – елемент матриці вхідних даних,  $\bar{y}_j$  – середнє значення для j-го фактора (ознаки),  $s_j$  – стандартне відхилення для j-го фактора.

Крок 2. Обчислюється коваріаційна матриця, яка показує, які ознаки корелюють між собою. Коваріаційна матриця є симетричною матрицею, де кожен елемент показує ступінь кореляції між двома ознаками

$$Cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1},$$

де  $\bar{x}$  - арифметичне середнє даних X,  $\bar{y}$  - арифметичне середнє даних Y, n – розмір вибірки.

Крок 3. Знаходяться власні значення та власні вектори коваріаційної матриці (власні значення показують, яка дисперсія притаманна кожній головній компоненті, а власні вектори є напрямками у просторі ознак).

Крок 4. Виконується сортування основних компонентів за зменшенням власних значень, тобто перші компоненти мають найбільшу дисперсію даних.

Крок 5. Вирішується, скільки основних компонентів залишити. Чим більше компонентів залишено, тим більше інформації зберігається, але розмірність даних залишається високою.

Крок 6. Виконується проєкція вихідних даних на новий простір ознак. Цей новий простір матиме меншу розмірність і буде лінійними комбінаціями вихідних ознак.

### **Розробка методу підвищення оперативності моделі класифікації даних за рахунок зменшення кореляції ознак**

У цій роботі у якості вихідних даних використано набір UNSW-NB 15, який був розроблений у лабораторії Cyber Range Австралійського центру кібербезпеки (ACCS) та містить інформацію про нормальне функціонування мережі та під час синтетичних вторгнень.

Набір даних містить атрибути, які характеризують наявність або відсутність таких типів атак:

Analysis, Backdoors, DoS, Exploits, Fuzzers, Generic, Reconnaissance, Shellcode and Worms.

Для дослідження ефективності моделі у середовищі GOOGLE Colab Python розроблено їх програмні моделі.

Якість моделі оцінено за допомогою таких характеристик:

- точність (Accuracy),
- влучність (Precision),
- повнота (Recall),
- міра F1 (F1 score).

У даній роботі запропоновано метод виявлення вторгнень в комп'ютерні мережі, який відрізняється від відомих наявністю спеціальної процедури зменшення кореляції вихідних даних, що дозволило підвищити оперативність процесу ідентифікації.

Процедура зменшення кореляції вихідних даних базується на наступному алгоритмі:

Крок 1. Всі категоріальні ознаки перетворюємо на числові значення методом `factorize()`. Заповнюємо пропуски даних.

Крок 2. Аналізуємо ознаки та видаляємо з набору даних неінформативні ознаки.

Крок 3. Будуємо кореляційну матрицю.

Крок 4. Якщо є ознаки що корелюються між собою більш ніж заданий параметр кореляції, (наприклад, 90%), то обробляємо їх методом головних компонент (PCA). Для цього формуємо датафрейми з двох ознак, що максимально корелюють між собою та застосовуємо метод головних компонент. Кожний набір перетворюємо на нову ознаку. Після формування нових ознак видаляємо старі та додаємо нові ознаки до основного набору даних.

Крок 5. Будуємо модель та оцінюємо її якість. Якщо якість моделі суттєво не змінилася та вище

заданого порогового значення, то повертаємося до кроку 4, інакше до кроку 6.

Крок 6. Якщо точність моделі суттєво знизилась, то виконуємо аналіз ознак які були оброблені методом головних компонент на кроці 4 і приймаємо рішення щодо їх відновлення. Завершуємо процес.

Відповідно до вищенаведеного алгоритму виконано попередню обробку даних набору UNSW-NB 15. За результатами аналізу видалено з набору даних такі ознаки: «`id`, `attack_cat`, `label`» оскільки вони не містять корисної інформації. Попередній аналіз даних показав наявність в даних ознак, що корелюють (рис. 1). Дані які мають кореляцію вище 90% були спроектовані у новий набір даних за допомогою методу головних компонент (PCA).

Дослідним шляхом було виявлено, що якщо обробити методом головних компонент або видалити будь яку з ознак «`ct_srv_src`» або «`ct_dst_src_ltm`», то точність класифікації помітно знижується. Тому вирішено залишити ці ознаки в датасеті попри їх кореляцію у 94 відсотки. Таким чином, за результатами експертного аналізу та використання вищенаведеного алгоритму 42 ознаки датасету трансформовано в 31 ознаку.

Надалі виконано нормалізацію даних. Крім того, оскільки в цьому наборі класи розподілені приблизно порівну (з 82332 загальної кількості 45332 це атаки), то балансування класів не виконувалась.

Для оцінки якості розробленого методу досліджено ансамблеві моделі на основі алгоритмів: Gradient Boosting, Random Forest (за умови стандартного налаштування параметрів моделі) та нейронні мережі.

Результати дослідження ансамблевих моделей наведено в табл. 1.

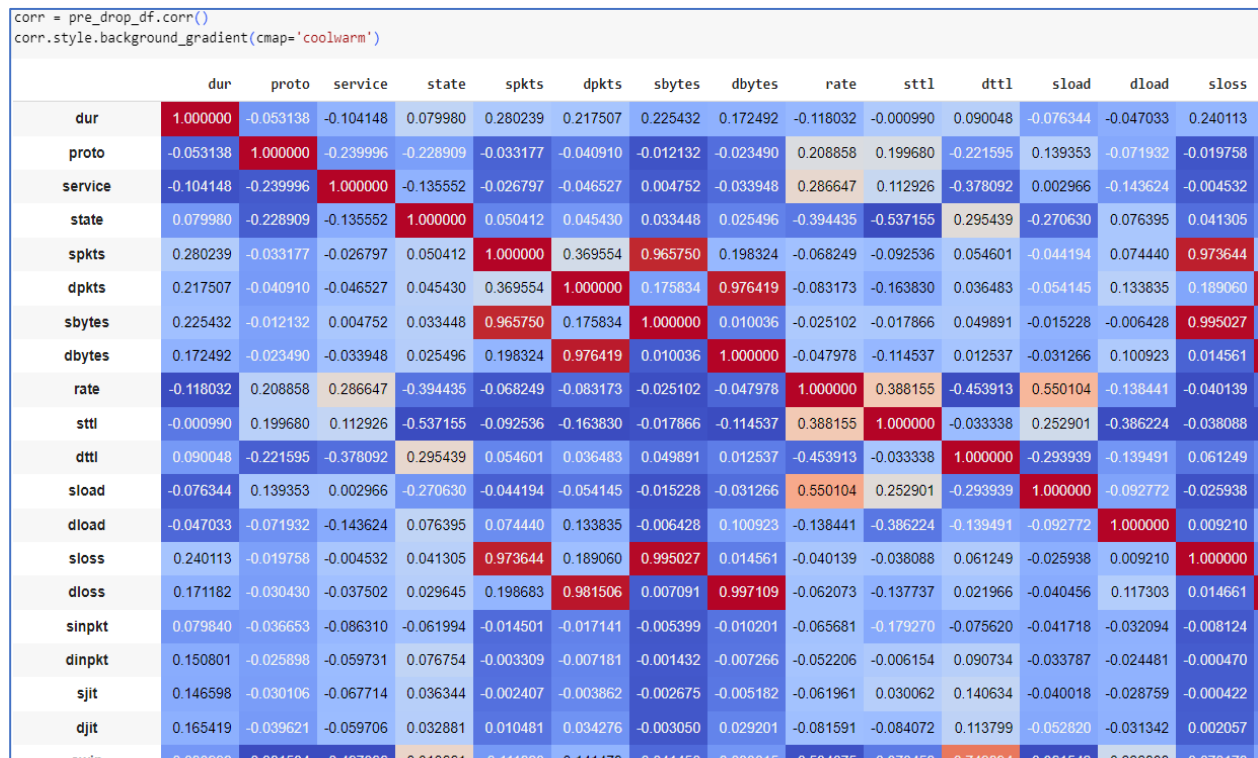


Рис. 1. Кореляційна матриця для даних UNSW-NB 15



Таблиця 1 – Показники якості та оперативності моделей на основі алгоритмів: Gradient Boosting та Random Forest

Показники якості та оперативності моделі	Дані після обробки запропонованим методом		Дані без обробки	
	Gradient Boosting	Random Forest	Gradient Boosting	Random Forest
Accuracy	0.959	0.975	0.962	0.978
Precision	0.960	0.975	0.960	0.975
Recall	0.960	0.975	0.960	0.980
F1-score	0.960	0.975	0.965	0.980
Час навчання, с	26.8	11	32	12
Час розпізнавання, с	0.04	0.3	0.06	0.6

Як видно із таблиці, зменшення кореляції ознак надало можливість зменшити час навчання моделі та підвищити час розпізнавання до 2 разів. При цьому точність моделі практично не змінилась.

У якості нейронних методів досліджено: повнозв'язну нейронну мережу (FCNN) та згорткову нейронну мережу (CNN).

Розробку моделі класифікації на основі повнозв'язної нейронної мережі виконано з використанням бібліотек “tensorflow” та “keras” GOOGLE COLAB Python. Нейронна мережа має один

прихований шар, який містить 128 нейронів. При налаштування моделі використано функцію активації “relu”, вихідний шар на два виходи з функцією “softmax”, оптимізатор – “adam”, функцію втрат – “categorical\_crossentropy”. Роботу моделі оцінюємо метриками якості: “accuracy”, “precision”, “recall”, “f1-score”.

Процес навчання містить десять епох з розміром батчу (вибірки) 64. Результати дослідження моделі на основі повнозв'язної нейронної мережі з одним прихованим шаром наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Показники якості та оперативності моделі на основі повнозв'язної нейронної мережі FCNN

Показники якості та оперативності моделі	Дані після обробки запропонованим методом	Дані без обробки
Accuracy	0.949	0.951
Precision	0.949	0.951
Recall	0.949	0.951
F1-score	0.948	0.951
Час навчання, с	13	24
Час розпізнавання, с	0.9	1.3

Як видно із таблиці, оперативність моделі збільшилась на етапі навчання до 1,9 разів, на етапі розпізнавання – до 1,4 разів. Згорткова нейронна мережа (Convolutional Neural Network, CNN) працює з багатовимірними даними, що потребує, у нашому випадку, перетворення та нормалізації даних. Так для датасету, попередньо обробленого за допомогою методу головних компонент (PCA), створено масив розмірністю (31, 31, 3), де перші два значення це висота та ширина кадру в пікселях а останнє значення це три

канала кольору (RGB). Тобто кожен піксель представлений трьома значеннями каналів. Для необробленого датасету розмірність буде (42, 42, 3).

При побудові моделі використано такі параметри налаштування: тип оптимізатор – “adam”, функція втрат – “categorical\_crossentropy”.

Процес навчання містить десять епох з розміром батчу (вибірки) 128.

Результати дослідження моделі на основі згорткової нейронної мережі (CNN) наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Показники якості та оперативності моделі на основі згорткової нейронної мережі (CNN)

Показники якості та оперативності моделі	Дані після обробки запропонованим методом	Дані без обробки
accuracy	0.990	0.993
precision	0.990	0.993
Recall	0.990	0.993
F1-score	0.989	0.993
Час навчання, с	28	37
Час розпізнавання, с	0.3	0.5

Як видно із таблиці, оперативність моделі збільшилась на етапі навчання до 1,3 разів, на етапі розпізнавання – до 1,6 разів.

### Висновки

У рамках дослідження виконано аналіз різних підходів до підвищення оперативності моделей виявлення вторгнень у комп'ютерні мережі за умови наявності ознак, які корелюють.

Розглянуто найбільш поширені способи оцінки кореляції ознак. Досліджено такі підходи зменшення кореляції ознак: метод головних компонентів (Principal Component Analysis, PCA), метод незалежних компонентів (Independent Component Analysis, ICA), L1 та L2 регуляризація.

Запропоновано спеціальну процедуру зменшення кореляції вихідних даних. Розроблено програмні моделі ідентифікації стану комп'ютерних мереж на основі алгоритмів: Gradient Boosting, Random Forest, повнозв'язної нейронної мережі (FCNN) та

згортової нейронної мережі (CNN). У якості вихідних даних використано набір UNSW-NB 15, який містить інформацію про нормальне функціонування мережі та під час вторгнень. Виконано їх порівняльний аналіз.

Отримано, що зменшення кореляції ознак надало можливість підвищити оперативність ідентифікації стану комп'ютерних мереж до 1,9 разів на етапі навчання та до 2 разів на етапі розпізнавання. При цьому точність моделі практично не змінилась

Таким чином, в даній роботі запропоновано метод виявлення вторгнень в комп'ютерні мережі, який відрізняється від відомих наявністю спеціальної процедури зменшення кореляції вихідних даних, що дозволило підвищити оперативність процесу ідентифікації стану комп'ютерної мережі.

Подальші дослідження будуть спрямовані на дослідження моделей ідентифікації стану комп'ютерної мережі на основі моделі "Vision Transformer for Small-Size Datasets".

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Vergara, J.R., Estévez, P.A. A review of feature selection methods based on mutual information. *Neural Comput & Applic*, 2014, Vol.24, pp.175–186. <https://doi.org/10.1007/s00521-013-1368-0>
2. Hoque, N., Bhattacharyya, D.K., & Kalita, J.K. MIFS-ND: A mutual information-based feature selection method. *Expert Syst. Appl.*, 2014, Vol.41, 6371-6385. [https://www.researchgate.net/publication/262526444\\_MIFS-ND\\_A\\_mutual\\_information-based\\_feature\\_selection\\_method](https://www.researchgate.net/publication/262526444_MIFS-ND_A_mutual_information-based_feature_selection_method)
3. Smita Chormunge, Sudarson Jena. (). Correlation based feature selection with clustering for high dimensional data. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2018, Vol. 5 (3), pp.542-549. <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2017.06.004>
4. Hall, M.A. (). Correlation-based feature selection of discrete and numeric class machine learning, *Working paper*. Hamilton, New Zealand: University of Waikato, Department of Computer Science., 2000, pp.1-10. <https://hdl.handle.net/10289/1024>
5. Krzysztof Michalak, Halina Kwasnicka. Correlation-based feature selection strategy in classification problems. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, 2006, Vol. 16(4), pp.503–511. <https://bibliotekanauki.pl/articles/908379.pdf>
6. Ibrahim, S.; Nazir, S.; Velastin, S.A. Feature Selection Using Correlation Analysis and Principal Component Analysis for Accurate Breast Cancer Diagnosis. *J. Imaging*, 2021, Vol.7, pp. 225-241. <https://doi.org/10.3390/jimaging7110225>
7. F. Vrins, J. A. Lee, M. Verleysen, V. Vigneron and C. Jutten, "Improving independent component analysis performances by variable selection," 2003 IEEE XIII Workshop on Neural Networks for Signal Processing (IEEE Cat. No.03TH8718), Toulouse, France, 2003, pp. 359-368, doi: <https://10.1109/NNSP.2003.1318035>.
8. Ng. Andrew. Feature selection, L1 vs. L2 regularization, and rotational invariance. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*, 2004, pp 78-84. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1015330.1015435>
9. Karen Garate-Escamilla A, Hassani AHE, Andres E, Classification models for heart disease prediction using feature selection and PCA, *Informatics in Medicine Unlocked*, 2020, pp. doi: <https://doi.org/10.1016/j.imu.2020.100330>
10. Mishra, S., Sarkar, U., Taraphder, S., Datta, S., Swain, D., & Saikhom, R. et al. Multivariate Statistical Data Analysis- Principal Component Analysis (PCA). *International Journal of Livestock Research*, 2017, Vol.7(5), pp. 60-78. <http://doi.org/10.5455/ijlr.20170415115235>

Received (Надійшла) 11.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.11.2023

### Method of increasing the efficiency of data classification at the account of reducing the correlation of the sign

Svitlana Gavrylenko, Vadym Poltoratskyi

**Abstract.** The object of the study is the process of identifying the state of the computer network. The subject of research is methods of identifying the state of computer networks. The purpose of the article is to increase the efficiency of detecting intrusions into computer networks by reducing the correlation of features. Methods used: methods of artificial intelligence, machine learning, methods of reducing the correlation of features. The following results were obtained: The effectiveness of using approaches that reduce data correlation was investigated: the method of principal components (PCA), independent components (ICA), L1 and L2 regularization, the method was justified for further research. According to the research results, a special procedure for reducing the correlation of the initial data is proposed. To evaluate the quality and efficiency of the proposed procedure, software models based on: Gradient Boosting, Random Forest, fully connected neural network (FCNN) and convolutional neural network (CNN) were developed. The UNSW-NB 15 set, which contains information on normal network functioning and during intrusions, was used as the source data. A comparative analysis of the quality and efficiency of the developed models was performed. Conclusions. The scientific novelty of the obtained results lies in the development of a method for detecting intrusions into computer networks, which differs from known methods by the presence of a special procedure for reducing the correlation of the output data, which made it possible to increase the efficiency of the identification process.

**Keywords:** machine learning, data classification, data preprocessing, data correlation, computer networks, neural networks, ensemble classifiers, intrusion detection systems.

В. О. Дяченко, О. П. Міхаль

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## ПЕРСПЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ВДОСКОНАЛЕНОГО КЛАСИЧНОГО АЛГОРИТМУ КАРТ КОХОНЕНА У РОЗПОДІЛЕНИХ ЕНЕРГОКРИТИЧНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

**Анотація. Актуальність.** Стандартний варіант алгоритму карт Кохонена (КК) може бути вдосконалений з включенням паралельного знаходження кількох нейронів-переможців та подальшою селекцією областей сенсорного поля, що не перетинаються. Зазначений підхід, закладений у методології модифікованих карт Кохонена (МКК), перспективний стосовно напрямів розвитку штучного інтелекту (ШІ) на основі штучних нейромережевих структур (ШНС). У порівнянні зі стандартним варіантом, МКК забезпечують часткове розпаралелювання процедур класифікації об'єктів у рамках кожної з ітерацій ідентифікації, як до процедури навчання ШНС, так і у робочому режимі. Показано, що подібна ж особливість, але в більш розвиненому вигляді, властива також людському інтелекту (ЛІ), і реалізується в нейронних структурах людського мозку (ЛМ), що є носієм ЛІ. Цікаво, що подібними структурами в ЛМ реалізується знижена енерговитратність і підвищена живучість системи при обмеженому фіксованому виході з ладу невеликої кількості елементів. Ці якості, мабуть, потенційно можуть бути в перспективі реалізовані при подальшому розвитку МКК. **Мета роботи** – демонстрація відповідності низки особливостей роботи МКК – елементам та особливостям організації інформаційних процесів у структурах ЛМ, який загалом доцільно розглядати як прототип при розробці систем ШІ.

**Ключові слова:** карти Кохонена, модифікація, штучний інтелект, штучна нейромережева структура, енергокритичні сенсорні мережі.

### Вступ

Комп'ютерна система (КС) є підсилювачем людського інтелекту (ЛІ) У цьому полягає її призначення [1]. З появою КС, ШІ отримав "зовнішню реалізацію" щодо підтримки розумового процесу, окремо від (замість, поряд з) людського мозку (ЧМ). Цим практично визначилася неминучість появи штучного інтелекту (ШІ), як етапу розвитку КС. Наступне – впливає із попереднього. Тому, щойно як було з'ясовано, що ШІ є (має бути) сутнісним продовженням ЛІ, окреслився досить очевидний шлях – проєкціювання уявлень про нейронні мережеві структури ЛМ на КС. Так виникла концепція штучних нейромережевих структур (ШНС). Еволюція мереж нейронів ЛМ йшла своїм складним (не до кінця ще й зараз зрозумілим) шляхом. На відміну від неї, ШНС (як продукт роботи ЛМ) досить швидко "еволюціонували" із застосуванням засобів комп'ютерного моделювання. Одним з варіантів, що вижили (виявилися доцільними і продуктивними в ідейному плані) виявилися карти Кохонена, в яких процедура ідентифікації об'єктів, що розпаралелюється, була зведена до послідовної (визначення нейрона-переможця та таке інше). Запропонована модифікована карта Кохонена (МКК) [2, 3] частково долає низку обмежень стандартної моделі КК.

Удосконалення алгоритму КК, включає паралельне знаходження кількох нейронів-переможців для кількох навчальних образів, з наступною селекцією областей сенсорного поля, що не перетинаються, і модифікацією деяких нейронів-переможців. У сукупності це призводить до скорочення часу навчання [4] і в кінцевому рахунку до скорочення енергоспоживання в пристроях і системах, де алгоритм МКК застосовується. Частково розпаралелюється процес ідентифікації об'єктів, за рахунок чого скорочується кількість ітерацій під час навчання. Так само, важлива особливість МКК у порівнянні зі стандартним

варіантом КК - повніша відповідність логіці паралельності взаємодій між окремими нейронами в ЛМ.

**Мета цієї роботи** – демонстрація перспективності використання вдосконаленого алгоритму КК стосовно розподілених енергокритичних сенсорних мереж. Для цього – демонструється відповідність низки особливостей роботи МКК – елементам та особливостям організації інформаційних процесів у структурах ЛМ, який – de facto – розглядається як прототип при розробці систем ШІ.

### Основна частина

Призначення КС – бути підсилювачем ЛІ [1]. Містищем ЛІ в основному є ЛМ. Сама людина (*Homo sapiens*) – істота досить лінива. Що стосується об'єктів живої природи, під лінню слід розуміти економне ставлення до витрачання енергії. *Homo sapiens*, я біологічний вид, в силу обставин, про які на даний момент у палеонтологів немає остаточної єдиної думки (дослідження та зіставлення точок зору (гіпотез) у них продовжуються), отримав аномально розвинений мозок. ЛМ має масу ~3% маси всього тіла, але споживає при цьому ~12% енергії організму в стані споглядання (фактичної бездіяльності), і до ~25% у стані роздумів (обдумування проблем). Подібна енерговитратність роботи ЛМ автоматично стимулює подальший розвиток ЛІ та підштовхує *Homo sapiens* до подальшої економії енерговитрат (тобто в даному розумінні сприяє "розвитку схильності" до лінощів).

Цей "рух по колу", що здається нескінченним, - в проєкції на вісь часу – призводить, зокрема, до виникнення (вигадування) різних підсилювачів (фізичних, а потім і інтелектуальних) можливостей представників виду *Homo sapiens*. У сукупності, все це є інтелектуальним (технологічним та науково-технічним) прогресом людства. Так, за появою перших знарядь праці, реалізуються найбільш економні форми господарської діяльності (осіле землеробство і

тваринництво), освоюються нові джерела енергії, нові види сировини, нові технології переробки та інше. Таким чином в цілому, в укрупненому масштабі часу, історія людства виглядає як послідовність технологій, що змінюються.

До середини XX століття, у зв'язку з освоєнням нових видів енергії (ядерна енергетика), були потрібні нові обчислювальні можливості, оскільки колишні (механічні обчислювальні пристрої) були надто трудомісткі у використанні. Якби для розрахунково-конструкторських та інших прикладних обчислень з метою розвитку ядерної енергетики було задіяно виключно механічне лічильне обладнання (арифмометри "Фелікс") – тільки для штату співробітників-обчислювачів знадобився б зовсім "не підйомний" для держави фонд заробітної плати. Тому виникла потреба і десь до 50-х років минулого віку було реалізовано вказаний підсилювач ЛП – КС.

На даний момент - подібна ситуація вимальовується для людської цивілізації за численними іншими напрямками розвитку. Поточного наявного (реалізованого в людях) мозкового ЛП може елементарно не вистачити (у планетарних масштабах) для вирішення кола проблем, що ширяться, в умовах вичерпання розроблених нині ресурсів і обмеженого біологічного потенціалу планети (чисельності населення, гранично можливої щодо забезпечення продуктами харчування). У зв'язку з цим неминуче та повномасштабно зростатиме актуальність ШІ. Цілком імовірно, що та активність розвитком технологій ШНС, яку ми спостерігаємо зараз (ChatGPT та інше), - вже початок наступного етапу кардинальної та вимушеної інтелектуалізації людського оточення (середовища перебування виду *Homo sapiens*). Може виникнути ситуація, що численні потенційні небезпеки, що виходять з застосування ШІ (зокрема, згідно з прогнозами письменників-фантастів), виявляться значно меншими, порівняно з масштабами поточних проблем людства, людської цивілізації, біологічного виду *Homo sapiens*.

Топовим прототипом розробки систем ШІ завжди був і залишається ЛП, локалізований, як належить, переважно, у ЛМ. Інші топові прототипи не потрібні, зараз не виявлені, або просто не існують. Так, не відомі (або, можливо, в принципі відомі, але не доступні для вивчення) інші об'єкти живої природи, які, можливо, функціонально більш ефективні в середовищі виду *Homo sapiens*. Тому – реально домінує парадигма «Людина – є мірило всіх речей» (Протагор).

Саме поняття "інтелект" - узагальнено (інтуїтивно) сприймається як здатність ефективно функціонувати в умовах навколишнього середовища. Спочатку поняття "інтелект" розглядалося саме у співвідношенні з людським існуванням. Пізніше це поняття було поширене (розширено – у пізнавальних та порівняльних цілях) так само на інші об'єкти тваринного світу. При цьому окремим (дуже плідним) напрямком вивчення стали критерії відмінності (переваги та недоліки) тваринного інтелекту порівняно з ЛП.

"Середовищем" або "конструктивно-технологічним матеріалом", на якому в тваринному (людському включно) світі реалізується інтелект, є нейрони

і зв'язки між ними, що утворюють в сукупності нейронні мережі - нервові системи.

Кількість нейронів в даному живому організмі (в живому стані) - питання проблематичне, оскільки на даний момент відсутнє обладнання (технічні засоби), за допомогою якого можна було б зробити елементарний підрахунок числа нейронів. Так, найбільш розвинений засіб проникнення в роботу живого ЛМ - томографія - на два порядки (за лінійним розміром) не досягає точності відображення, яка була б достатня для розрізнення окремих нейронів. Тобто, щоб розгледіти один нейрон на екрані комп'ютера, підключеного до томографа, кожен елемент 3D образу мозку, що знімається томографом, повинен бути замінений "кубиком" з  $10^6$  елементів. Відповідно, міжнейронні зв'язки - ще дрібніші об'єкти - ще меншою мірою доступні нині вивчення засобами томографії. Ефектні кольорові знімки з томографів, що публікуються зазвичай у наукових журнальних з вивчення функціонування живого мозку при вирішенні людиною (власником цього мозку) тих чи інших логічних завдань, - насправді демонструють активність роботи кровоносної системи в тих чи інших частинах кори головного мозку. Зрозуміло, ця активність "перемікається" (змінюється) відповідно до "запитів" відповідних областей мозку на "пріоритетне енергозабезпечення" відповідних областей мозку. Але як "засіб підрахунку числа нейронів" або "засіб локалізації міжнейронних зв'язків", - томограф на даний час зовсім не достатній.

Кількість нейронів і деякі міжнейронні зв'язки на даний момент можуть бути докладно вивчені тільки із застосуванням засобів оптичної мікроскопії. Це означає, що для великих об'єктів, типу ЛМ, подібне вивчення можливе – лише *post factum*, на препаратах, у вигляді тонких зрізів на предметному склі. Що стосується ЛМ – це може бути до 10 тисяч зрізів.

Складність полягає також і в тому, що під мікроскопом з'являється лише сіре поле. Щоб на ньому було видно конкретний окремий нейрон – він має бути підфарбований. Для цього - при виготовленні відповідного препарату, нейрон повинен бути слабо пошкоджений, щоб всередину нього могла проникнути підфарбовуюча речовина. Нейрон має бути пошкоджений саме слабо. Якщо, наприклад, його буде "перерізано навпіл у довжину" – це буде значне пошкодження. Для такого нейрона просто не буде поняття всередині та зовні. Результат: на такому "перерізаному" нейроні речовина, що підфарбовує, візуально ніяк не проявиться і цей нейрон залишиться невидимим під мікроскопом.

Істотна також товщина шару нарізаного препарату. Для надто тонких шарів - надто багато дуже пошкоджених (що візуально не спостерігаються) нейронів. Для занадто товстих шарів занадто багато нейронів залишаться невидимими через те, що вони знаходяться всередині шару, і тому не пошкоджені, і тому залишилися не підфарбованими.

Таким чином, сам процес виготовлення комплекту препаратів (вказані 10000 тонких зрізів мозку) - є суттєвим фактором невизначеності при візуальному підрахунку числа нейронів, які реально спостері-

гаються на препараті (на даному зрізі). Очевидно, даний чинник можна врахувати лише оціночно, із застосуванням додаткових теоретичних уявлень, тобто. з урахуванням думок експертів. При цьому ще одна складність - можливі експерти не мають жодних додаткових реальних даних, крім тих, що представлені на цих препаратах (на зрізах), що вивчаються.

З огляду на сказаного, ЛМ, - навіть досліджуванний *post factum*, коли начебто є весь предмет, що вивчається, цілком - предмет не може бути досить стійко однозначно оцінений за кількістю наявних у ньому нейронів. У різні часи у різній літературі висловлювалися різні думки щодо чисельності нейронів мозку, - взагалом в діапазоні від  $10^{10}$  до  $10^{16}$ . Зараз - спостерігається деяке "єдність розкиду думок": число нейронів у мозку, приблизно (за порядком величини) оцінюється як  $10^{12}$ . При цьому, є можливим розкид у межах "на порядок", через велику мінливість об'єму (ваги) мозку від індивіда до індивіда. Зокрема, з приводу ваги мозку є цифри порядку: розподіл від 800 гр. до 2,5 кг., з маточікуванням 1,35 - 1,4 кг. Отже, "порядок величини", як міра оцінки, у нейрофізіолозії є цілком припустимою. Ще більшою мірою - "теоретично передбачуваною" і "середньостатистичною на досить великих вибірках" - є кількість міжнейронних зв'язків. Імовірно, кожен нейрон має від сотень тисяч до десятків мільйонів коннектів з іншими (ближніми і більш віддаленими) нейронами.

Дослідження з цих питань, зазвичай, продовжуються. Нові методи принесуть нові дані, з урахуванням яких будуть скориговані поточні статистичні уявлення. Слід також очікувати, що принципово нові дані і принципово нова оцінка самого поняття точності з'являться тільки після розробки методів непошкоджуючого спостереження живого (функціонуючого) мозку, типу томографії зі значно кращою "гостротою зору".

Важливою особливістю ЛМ є його реструктурування при збереженні загальної надійної працездатності. На даний момент відомо, що людина втрачає щодобово, середньостатистично ~5000 нейронів. Цей "природний спад" - залишається порівняно (знову ж таки, середньостатистично) постійним від народження, і на протязі всього життя. Зробимо оцінку масштабів цього явища. 100 років це оптимістична оцінка тривалості життя індивіда для нашого (поточного, теперішнього) історичного періоду. Відомі (документально підтвержені) топові (поодинокі, рекордні) випадки 123 - 125 років. Беремо тривалість 40000 діб, що теж відповідає оптимістичному (але все ще реальному) значенню ~109,5 років. Отримуємо втрату протягом життя  $2 \cdot 10^8$  нейронів, тобто, 0,02% від вихідного (тобто при народженні) числа  $10^{12}$ . При цьому людина переважно знаходиться "в здоровому глузді і твердій пам'яті" і в основному здатна вирішувати завдання, пов'язані з взаємодією з навколишнім середовищем. Таким чином, ЛМ - досить надійна мережа, що реструктурується, та здатна довгостроково залишатися цілком функціональною. Тому - навіть у чисто "інженерно-розробницькому" та "конструкторсько-технологічному" плані - ЛМ,

його будова та принципи дії - цілком придатний був би, як прототип при розробці систем ШІ.

**1. Подібність принципів роботи людського мозку та МКК** Як зазначалося [1], призначення КС - бути підсилювачем ЛП. При цьому характерно, що КС працює зовсім не так (принципово інакше), ніж ЛМ, що є вмістилищем (пристроєм для реалізації) ЛП. Так у ЛМ принципово відсутні процеси щодо переміщення інформації. Немає копіювання в область обчислень та подальшого копіювання результатів назад у пам'ять. Сама пам'ять не є чимось виділеним, призначеним виключно для зберігання інформації. Виділених локалізованих структур, призначених виключно для обчислень, - також немає. Обчислення - це є, з широкої точки зору, - алгоритми для передбачення поведінки того, що є у навколишньому середовищі. Навколишнє середовище (можливо, агресивне) з'являється лише після народження індивіда. Тому алгоритмічної частини взаємодії з довкіллям - ЛП успішно навчається. А початковий зміст ЛП - "чистий лист" і кілька (мала кількість) простих процедур відображення на ньому (у міру надходження) інформаційного контенту навколишнього світу.

Відсутність переміщення інформації у пам'яті та відсутність спеціалізованих обчислювальних структур - ключова відмінність ЛМ від КС за концепцією Фон Неймана [5]. Інформація накопичується в ЛМ та зберігається там "нерухомо". Звернення до того чи іншого фрагмента інформації здійснюється деякою "змінною активності" (щось на зразок перемикання уваги) певних фрагментів головного мозку. Ці "перемикання" і спостерігаються засобами сучасної томографії. Ці ж "перемикання уваги" демонструють базовий принцип функціонування ЛМ - економію енергії або "схильність до лінощів".

Більш примітні продуктивні аспекти роботи ЛМ (власне мислення, планування, постановка завдань, поява нових ідей та ін.), як елементи прототипування стосовно проблематики ШІ, - вимагають окремого розгляду. Тут же відзначимо тільки схожість низки характеристик (особливостей роботи) з системами ШІ, що розробляються. Ця схожість, втім, цілком закономірна, оскільки, як зазначалося, КС є підсилювачами ЛП [1], а ШНС є закономірним розвитком КС.

**2. Принцип роботи вдосконаленого алгоритму КК.** КК, як спеціалізований апарат обробки інформації [4], з'явилися порівняно недавно в масштабах загального поступального розвитку науки, і досить давно з огляду на стрімкий темп прогресу засобів КС. Незвичайність (несподіванка) появи КК у тому, що цей апарат забезпечив навчання ШНС певного типу (з певною організацією) за методикою без вчителя. За рахунок спеціальної структурно-алгоритмічної організації необхідність у вчителі - нівелюється. У якісному описі, це виглядає так.

Спочатку задається деяка базова (фонова, псевдовипадкова) "розкладка" можливих реакцій системи на зовнішні дії. Етап навчання (послідовність навчальних образів) залишається. Але за рахунок структурного розпаралелювання обробки інформації, безпосередньо всередині системи визначається деяке "найкраще" рішення для кожного наступного навчального

образу, що подається. При цьому "розкладка" реакції системи - щоразу трохи коригується. В результаті, формується деяка фінальна "розкладка" -

класифікатор "станів середовища", - як вона представляється для КК за результатами обробки навчальної послідовності.

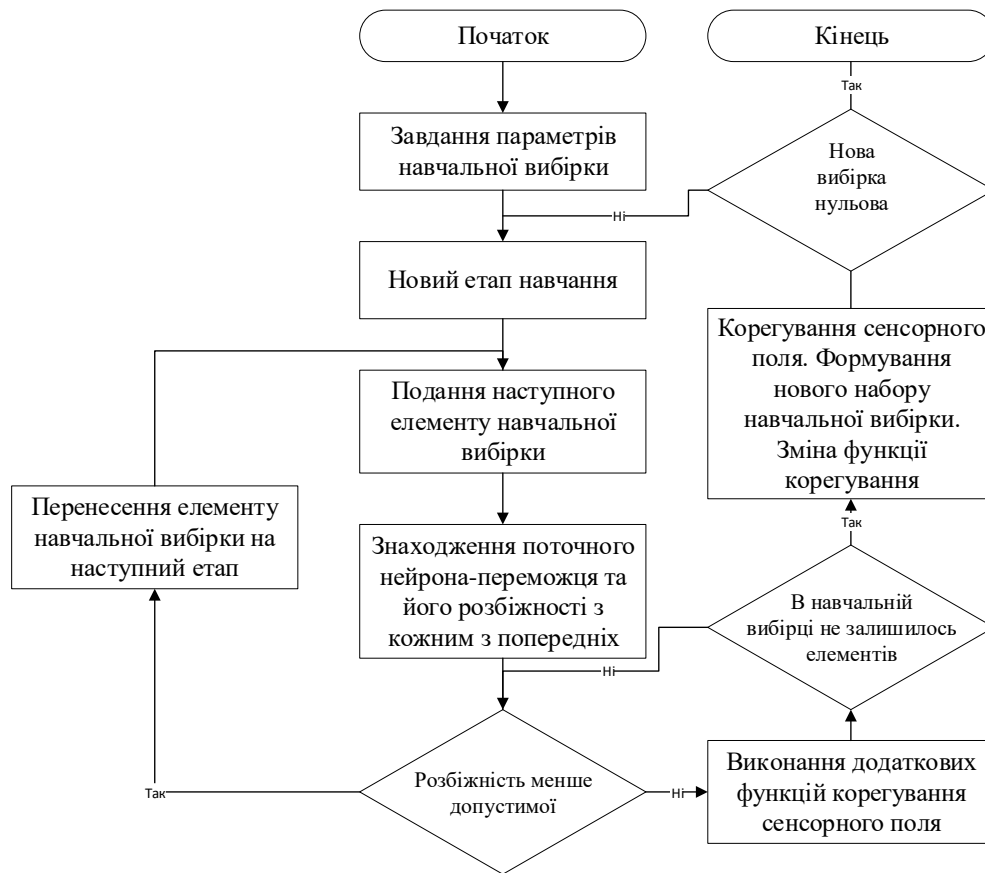


Рис. 1. Схема вдосконаленого алгоритму КК

Таким чином, функцією вчителя залишається лише підготовка та подача початкової навчальної послідовності. Подання сигналів заохочення та покарання – не потрібне. Далі (після навчання) КК готова до переходу у робочий стан, у якому, якщо потрібно, паралельно може відбуватися “придбання додаткового досвіду” – донавчання системи, вже з робочою послідовністю образів. Легко бачити, що система, яка обходиться без вчителя, в “інтелектуальному плані” є більш автономною, більш адаптивною і потенційно більш надійною. На відміну від стандартного варіанта КК, в модифікованому варіанті (МКК) [3] вводяться додаткові можливості щодо розпаралелювання процесу навчання (донавчання) (рис.1). При цьому, формування кількох нейронів-переможців відбувається паралельно, скорочується час, економиться енергетичний ресурс. Система набуває додаткових рис подібності з ЛМ – апаратом реалізації ЛП. Таким чином вбачається, що КК – це далеко ще не вироблений напрямок. Розвиток і модифікація цієї методології – не лише відбиває вже досягнутий результат і пройдений етап розвитку, а й багато у чому передбачає загальний тренд майбутнього розвитку засобів ШІ.

### 3. Напрями подальшого розвитку МКК.

1. N-мірність робочого поля КК – аналог багатовимірності зв'язків (“клубка зв'язків”) між нейронами у ЛМ. У ЛМ немає лінійної впорядкованості, але є

“ступінь сусідства”: ближній, через одного, через два, і далі. Можливо, “магічне число”  $7 \pm 2$  [6] - насправді є міра ближнього міжнейронного сусідства (кількість сусідів першого кола – найближче оточення), що має місце у ЛМ. Також можливо, що активні нейрони позначають своїх ближніх сусідів (перше коло спілкування) мієлінізацією зв'язків із нею. Мієлінізовані міжнейронні зв'язки – більш високошвидкісні (до двох порядків). Згодом мелінізовані зв'язки і стають “ближніми сусідами” тому, що з ними встановлюються найшвидші “канали зв'язку”.

Даний шлях – нарощування зв'язків не за фіксованою (спочатку заданою) багатовимірною матрицею, а за відстеженням зростання частоти коннектів між окремими вузлами - може стати одним з напрямків удосконалення самонавчальних систем ідентифікації, типу МКК.

2. У ЛМ під час взаємодії між нейронами – утворюються нові міжнейронні зв'язки. При цьому, щоразу ситуація виглядає так, ніби з нейрона А в напрямку нейрона Б починає рости відросток (дендрит); і паралельно, у цей же час, з нейрона Б у напрямку нейрона А починає рости зустрічний відросток (аксон). Дендрит та аксон зістиковуються. Коннект між ними локалізується у вигляді деякої пляшки, всередині якої при проходженні сигналу відбуваються певні процеси.

З одного боку генеруються, з іншого боку сприймаються певні біохімічні речовини. І так далі.

Залишається не зрозумілим, як відбувається взаємоузгодження між А і Б про зустрічне пророщування відростків та утворення між ними коннекту. Факт наявності попереднього взаємоузгодження - очевидно незаперечний. Має місце синхронність та просторова координація. Самі процеси пророщування - зрозуміло, енерговитратні. Тому вони не ініціалізуються просто так.

Проте, подібне взаємоузгодження - є конкретний інформаційний процес, що передбачає - вже наявність деякого каналу зв'язку (тінювого, резервного, можливо, заснованого на невідомих принципах, типу "біополя") між А та Б до утворення коннекту між ними.

Ця проблема вказує на те, що принципи роботи ЛМ на даний момент вивчені ще мало. Саме собою - це природно для подібного складного об'єкта. Це означає, що ЛМ, як головний прототип розвитку систем ШІ, може містити і містить ще багато і багато прихованих можливостей. Однією з таких можливостей є тінювий (резервний) канал зв'язку.

3. Що стосується стандартного варіанту МК, може йтися про додаткову альтернативну систему коннектів між елементами матриці сенсорного поля. Можливий варіант реалізації (зрозуміло, він пов'язаний з додатковими ускладненнями) - додаткова (альтернативна, прихована, функціонально-специфічна)

паралельна система векторів для позначення елементів сенсорного поля.

У варіанті МКК, подібна додаткова векторизація елементів сенсорного поля може, зокрема, підтримувати деяку багаторанговість при ідентифікації об'єктів: паралельне створення протягом однієї ітерації - кількох нейронів-переможців, рознесених по різних рангах.

Вочевидь, усе це передбачає ускладнення алгоритмів. Вочевидь, запровадження ранговості має бути доцільне даним предметній області (конкретній області застосування МКК).

Але загалом, подібний підхід може забезпечити додатковий вииграш у продуктивності за рахунок скорочення кількості ітерацій.

### Висновки

МКК розглянуто у контексті загальних тенденцій розвитку систем ШІ як підсилювачів ЛМ.

Обговорено можливості та складності прототипування ШІ на основі ЛМ, як механізму реалізації ЛМ.

Обговорено принципи організації ЛМ у порівнянні з моделюванням окремих їх аспектів у МКК. Продемонстровано функціональну спільність організації цих структур. Відзначено, зокрема, перспективність МКК як системи, що відтворює регульовану енерговитратність, властиву ЛМ.

Розглянуто можливі напрями подальшого розвитку концепції МКК.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Михаль, О.Ф. Глобально-исторический контекст развития средств вычислительной техники // Бионика интеллекта. - 2014. - №1 (82). - С. 55-62
2. В.А. Дяченко, О.Ф. Михаль. Моделирование процесса диалогового обучения интеллектуальных самоорганизующихся систем // Системи управління, навігації та зв'язку, Полтава 2017, с.102-107
3. Дяченко В.О. Интеллектуальні підходи енергозбереження у безпроводних сенсорних комп'ютерних мережах // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. - Полтава: ПНТУ, 2020. - Т. 4 (62). - С. 114-118. - doi:https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.4.114.
4. В.А. Дяченко, О.Ф. Михаль Интеллектуальный аспект обучения модифицированных самоорганизующихся карт Кохонена // Бионика интеллекта. - 2015. - №2 (85). - С. 35-40.
5. Джон фон Нейман. Вычислительная машина и мозг. - М.: Изд-во АСТ; 2018.
6. George A. Miller. The Magical Number Seven, Plus or Minus Two. // The Psychological Review, 1956, vol. 63, pp. 81-97.

Received (Надійшла) 12.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.11.2023

### Perspectives of application of the advanced classical algorithm of Kohonen maps in distributed energy-critical sensor networks

V. Diachenko, O. Mikhal

**Abstract. Topicality.** The standard version of the Kohonen map algorithm can be improved by including the parallel finding of several winning neurons and the subsequent selection of regions of the sensory field that do not overlap. The mentioned approach, embedded in the methodology of modified Kohonen maps, is promising in relation to the directions of development of artificial intelligence based on artificial neural network structures. Compared to the standard version, modified Kohonen maps provide partial parallelization of object classification procedures within each of the identification iterations, both before the SNS training procedure and in the working mode. It is shown that a similar feature, but in a more developed form, is also characteristic of human intelligence and is realized in the neural structures of the human brain, which is the carrier of human intelligence. It is interesting that similar structures in human brain realize reduced energy consumption and increased survivability of the system with a limited fixed failure of a small number of elements. These qualities, apparently, can potentially be realized in the future during the further development of the modified Kohonen maps. The purpose of the work is to demonstrate the compliance of a number of features of the work of the MCC to the elements and features of the organization of information processes in the structures of human brain, which, in general, should be considered as a prototype in the development of artificial intelligence systems.

**Keywords:** Kohonen maps, modification, artificial intelligence, artificial neural network structure, energy-critical sensor networks.

Н. В. Єрмілова, Ю. Р. Зоураб, Р. О. Єрмілов

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

## МЕТОДИКИ АВТОМАТИЧНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ФОРМОЮ

**Анотація.** Аналіз літературних джерел показує, що необхідність розпізнавання як великих, так і дрібних об'єктів є важливим напрямком розвитку сучасних систем технічного зору роботів та інших технічних засобів автоматизації, які повинні вміти за вимірними значеннями ознак розпізнати будь-який об'єкт, що потрапив у поле їхнього зору, віднести його до деякого класу, прийняти рішення та видати команду маніпуляторам робота. У статті розглядаються підходи до розпізнавання з наступною класифікацією дрібних об'єктів за такими ознаками, як коефіцієнт еліптичності та коефіцієнт складності форми. Виділивши ознаки та їх комбінації для ідентифікації подібних об'єктів, можна натренувати модель машинного навчання на розпізнавання необхідних типів закономірностей. Проведене порівняння методик вимірювання площ проєкцій об'єктів, форма яких є близькою до прямокутної, об'єктів круглої форми, та об'єктів, які представляють собою довгу витягнуту фігуру складної форми. Зроблено оцінку точності вимірювання площі та периметрів складних фігур, визначені похибки вибраних значень радіусів малих об'єктів залежно від кроку квантування. Розглянута можливість розпізнавання об'єктів з використанням традиційних методів обробки зображень або сучасних мереж глибокого навчання: відкритої бібліотеки для роботи з алгоритмами комп'ютерного зору, машинним навчанням та обробкою зображень OpenCV, найновіших моделей розпізнавання SSD, R-FCN, Faster R-CNN, Mask R-CNN та YOLO, в архітектурі яких можна побачити багато покращень та досягнень у методологіях виявлення об'єктів. Показані переваги використання популярної моделі розпізнавання Faster R-CNN, що являє собою комбінацію між моделями RPN і Fast R-CNN, для швидкого розпізнавання дрібних об'єктів складної форми. Зроблено висновок, що автоматичні системи розпізнавання, які працюють за даною методикою, дозволяють досліджувати різноманітні об'єкти, відрізняються достатньо високою швидкістю, але у зв'язку зі складністю їх використання в реальному часі виправдане лише у тих випадках, коли ці об'єкти мають складну форму й не можуть бути розпізнані та класифіковані звичайними більш простими методами та засобами.

**Ключові слова:** розпізнавання, класифікація об'єктів, коефіцієнт еліптичності, коефіцієнт складності форми, точність вимірювання.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Образ – це об'єкт, процес або явище реального та абстрактного світу, який розпізнається за деякими ознаками, що збираються та оброблюються індивідуально і у сукупності. Розпізнавання образу не є безцільним заняттям і завжди супроводжується дією. В штучних інтелектуальних системах дія, як правило, має вигляд порівняння з деяким еталоном з наступним увімкненням в роботу виконавчого пристрою.

Відомо, що сьогодні вже використовуються неймережі, в яких машини здатні розпізнавати навіть символи на папері та банківських картках, підписи на офіційних документах, детектувати об'єкти тощо, ці функції полегшують працю людини і підвищують точність та надійність різних робочих процесів завдяки виключенню із завдання людського фактору.

Щоб навчити комп'ютер бачити та розуміти, що знаходиться на зображенні, люди використовують технології машинного навчання. Для цього збирають великі бази даних, у тому числі формують дата сети. Виділивши ознаки та їх комбінації для ідентифікації подібних об'єктів, можна натренувати модель машинного навчання на розпізнавання необхідних типів закономірностей. Але для того, щоб розпізнати зображення, нейронна мережа має бути попередньо навчена на даних.

Необхідність розпізнавання як великих, так і дрібних об'єктів є важливим напрямком розвитку сучасних систем технічного зору роботів та інших технічних засобів автоматизації, які повинні вміти

за вимірними значеннями ознак розпізнати будь-який об'єкт, що потрапив у поле їхнього зору, віднести його до деякого класу, прийняти рішення, та видати (або не видати) команду маніпуляторам робота [1].

Часто постає задача розділення з наступною класифікацією різноманітних об'єктів за деякою ознакою: питомою та абсолютною вагою, кольором, розміром, формою, оптичним якість. Така задача може поставати як для об'єктів промисловості, так і в сільському господарстві для розділення та очищення високовартісних сумішей. Якщо найчастіше використовувані властивості частинок компонентів суміші, що підлягає поділу, коливаються в однакових межах, то розподіл на основі цих властивостей за якісною ознакою виявляється неможливим. У таких випадках можна застосувати розпізнавання складних дрібних об'єктів за формою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Історично склалося так, що теорія розпізнавання образів розвивалася по двох напрямках: детерміністському та статистичному, хоча у цих напрямках є й багато спільного. Методика детерміністського підходу полягає на математично формалізованих емпіричних та евристичних методах, в основі яких лежить моделювання процесу міркувань. Тут використовується різноманітний математичний підхід: математична логіка, математична лінгвістика, теорія графів, математичне програмування та ін.

Статистичний підхід спирається на фундаментальні результати математичної статистики – послідовному аналізу, стохастичній апроксимації, теорії оцінок.



Інформаційну базу даного дослідження склали роботи науковців, які працювали по цих двох напрямках: Г. Аваліані, Р. Вудс, В.С. Антонюк, І.О. Артеменко, С.П. Вислоух, Р. Гонсалес, Є.В. Главач, У. Гренандер, А. Дейч, А.С. Довбиш, О.В. Катрук, В.В. Круглов, Е. Патрік, В.А. Утробін, Ф. Уосермен, Я.А. Фомін, Дж. Хан, Л.Н. Ясницький та ін. [2-9].

З аналізу робіт випливає, що питання розпізнавання дрібних об'єктів складної форми в реальному часі з наступною класифікацією за виділеними ознаками ще недостатньо вивчене і є досить актуальним.

**Мета роботи** – виявлення характеристик нетипових дрібних об'єктів, оцінка їх прогнозованих похибок при розпізнаванні для різної орієнтації фігур, визначення методології для класифікації таких об'єктів.

### Основна частина

Основними характеристиками нетипових дрібних об'єктів прийнято вважати колір, розміри, вагу, форму.

Розглянемо такі характеристики форми, як коефіцієнт складності та коефіцієнт еліптичності. Коефіцієнт складності форми визначають як відношення квадрата периметру об'єкту до його площі:

$$\gamma = \frac{P^2}{S}, \quad (1)$$

де  $P$  – периметр об'єкту,  $S$  – площа об'єкту.

Ця величина є мінімальною для круглих фігур ( $\gamma = 4\pi$ ). Чим більше відхилення від ідеального кола, тим більше значення вона приймає.

Ступінь еліптичності (подовження) досліджуваних об'єктів визначається співвідношенням осей фігури:

$$K = \frac{b}{a}, \quad (2)$$

де  $a$  та  $b$  – півосі еліпса, причому  $a > b$ .

Для реалізації класифікації та майбутнього сортування об'єктів за вказаними ознаками можна встановити матрицю-строку світлочутливих елементів таким чином, щоб проекція об'єкта, що рухається, проходила через неї. Тоді у кожен момент часу можна отримати деяку послідовність сигналів з матриці, суму яких можна представити єдиним результатом імпульсом, що характеризує «ширину» проекції фігури в даний момент. Однак сама по собі величина імпульсу не дає об'єктивного уявлення о формі об'єкта, а служить лише вихідним даним для отримання таких характеристик, як площа, периметр, коефіцієнт еліптичності.

Площу  $i$ -го об'єкта (рис. 1) при такому методі можна визначити як

$$S_i = \rho \sum_{j=1}^n l_j, \quad (3)$$

де  $\rho$  – відстань між сусідніми рядками,  $n$  – кількість хорд (сумарних імпульсів), що приходяться на проекцію об'єкта,  $l_j$  – довжина  $j$ -ї хорди.

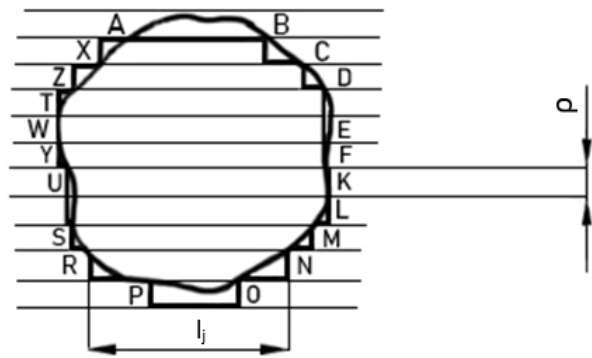


Рис. 1. Об'єкт, перетнутий лініями сканування

Справжній периметр фігури буде рівний сумі довжин дуг

$$AB+BC+CD+DE+\dots+XA.$$

Однак точне вимірювання дуг технічно реалізувати доволі складно, тому периметр фігури ми визначали як суму сторін ступінчастої фігури  $ABCDE\dots X$ , вертикальні сторони якої – це відстань між рядками, а горизонтальні – різниця між двома хордами на сусідніх рядках.

Цей метод хоч і дає меншу точність у визначенні периметра, але володіє безперечними перевагами з точки зору простоти реалізації схеми:

$$S_i = \rho \sum_{i=1}^n (l_i - l_{i-1}) + 2\rho, \quad (4)$$

де  $l_i, l_{i-1}$  – довжини  $i$ -ї та  $(i-1)$ -ї хорд.

Нами було розраховано, що при вимірюванні периметрів великого класу складних фігур значення та знак похибки зберігаються приблизно однаковими (у середньому 3,2%). З цієї точки зору найменш придатними для дослідження є фігури у вигляді ідеального вертикально орієнтованого прямокутника, так як по відношенню до інших, більш складних фігур, значення їх периметра виходить заниженим.

Величина вертикальної півосі еліпса

$$a = \rho \cdot n. \quad (5)$$

Інша піввісь еліпса визначається як довжина середньої хорди  $l_{сер}$ .

При проходженні проекції об'єкта через матрицю-строку буде необхідним встановити належність сигналу на різних рядках одному й тому ж об'єкту. Тоді з усієї сукупності сигналів у вихідний пристрій буде подаватися тільки один імпульс.

Визначення належності сигналу до однієї фігури можна здійснювати шляхом порівняння сигналів на двох «сусідніх» рядках. При такому порівнянні, як правило, використовують два критерії – «очікування з допуском» та «перекриття». Сутність критерію «очікування з допуском» полягає в тому, що сигнал на даному рядку може бути віднесений до фігури, сигнал від якої є на попередньому рядку у випадку, якщо цей сигнал лежить усередині певного інтервалу. Цей сигнал розташований на тому ж місці рядка, що й сигнал від попереднього рядка, а ширина інтервалу трохи більше сигналу на попередньому

рядку (з деяким допуском з обох сторін). Допуск, як правило, обирають залежно від форми об'єкта, що підлягає розпізнаванню.

Якщо об'єкт представляє собою довгу витягнуту фігуру складної форми, то необхідно брати більший допуск, але тоді погіршується роздільна здатність системи, з'являються невірні пов'язані сигнали, що відносяться до різних, але близько розміщених проєкцій об'єктів.

Критерій перекриття полягає в тому, що сигнал на даному рядку може бути віднесений до фігури, сигнал від якої був на попередньому рядку, якщо деяка його частина лежить на тій же відстані від початку рядка, що й деяка частина цього сигналу на попередньому рядку.

При використанні критерію перекриття для визначення параметрів фігур, що підлягають розпізнаванню, можна отримати значно менші похибки, і роздільна здатність системи в цілому підвищується. Недолік критерію перекриття дається взнаки при дослідженні значно витягнутих фігур. Для його усунення необхідно зменшити крок зчитування сигналу.

Проведемо оцінку точності вимірювання площі об'єктів, форма яких є близькою до прямокутної, за методом підсумовування хорд.

Нехай  $N$  – загальна кількість хорд, що приходяться на цей прямокутник. Неточності вимірювань, що обумовлені різними причинами, приведуть до того, що прямокутник буде мати вигляд складного багатокутника, а положення кожної з хорд не детерміновано.

У цьому випадку сума усіх хорд буде рівною

$$\sum_{i=1}^N l_i = l_1' q N + l_2' p N = N(l_1' q + l_2' p), \quad (6)$$

де  $l_1' = n \cdot x_0$ ;  $l_2' = (n+1) \cdot x_0$ ;

$p, q$  – відносні кількості хорд, що виявилися при вимірюванні більше або менше справжнього розміру. Величина в дужках є не що інше, як середнє значення  $l_{сер}$ .

Як би число  $N$  було достатньо великим, то величини  $p$  і  $q$  можна було б вважати імовірнісними. Тоді  $l_{сер}$  відповідало б справжньому значенню величини  $l$ , і площа прямокутної фігури вимірювалася би без похибок. Однак число  $N$  реальне і має кінцеве значення. Тому величини  $p$  і  $q$  являються частотами, а не ймовірностями.

Похибку у знаходженні справжнього значення  $l$  можна визначити, використовуючи формулу

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\rho \cdot q}{N}} \cdot x_0. \quad (7)$$

Тоді відносна похибка у визначенні площі фігури, близької до прямокутника, буде рівною

$$\delta = \left( \frac{\sqrt{\frac{\rho \cdot q}{N}}}{(n x_0 + \Delta x)} \right) \cdot x_0 = \frac{\sqrt{\rho \cdot q}}{\sqrt{N(n + \rho)}}. \quad (8)$$

Максимальна відносна похибка виникає, коли  $\rho = q = 0,5$ . Середня похибка у визначенні площі фігури, близької до прямокутника

$$\delta_{сер1} = \frac{1}{n\sqrt{\sigma N}}. \quad (9)$$

Однак реальна задача ускладнюється тим, що значення числа  $N$  не є для даного прямокутника незмінною величиною. Це значення може бути рівним як  $N$ , так і  $N+1$ , воно залежить від положення прямокутника на квантованому полі.

У цьому випадку максимальна похибка буде рівною площі прямокутника, що побудований на одному, наприклад, верхньому рядку, тобто  $l_{ряд} \cdot \rho$ , а середня похибка, відповідно, рівною величині

$$l_{ряд} \cdot \rho / \sqrt{\sigma}.$$

Відносна похибка у визначенні площі прямокутника за рахунок цього параметру складе

$$\delta_{сер2} = \frac{1}{N\sqrt{\sigma}}. \quad (10)$$

Таким чином, сумарна відносна похибка у визначенні площі проєкцій фігур, близьких до прямокутника, має вид

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_{сер1}^2 + \delta_{сер2}^2} = \frac{1}{N\sqrt{\sigma}} \sqrt{\frac{N}{n^2} + 1}. \quad (11)$$

Можна зробити висновок, що точність вимірювань залежить не від абсолютного значення роздільної здатності системи, а від кількості рядків  $N$ , що приходяться на досліджувану фігуру, та числа імпульсів  $n$ , які визначають довжину хорди цієї фігури.

Нами було розраховано, що для  $N=6, n=10$  похибка у вимірюванні площі проєкції фігури, близької до прямокутника складає близько 7%, при збільшенні  $N=10, n=10$  похибка знижується до 5%, а для  $N=50, n=100$  – похибка складає близько 0,8%.

Обчислення похибок площ фігур, близьких до круглої форми, відбувається аналогічно, але крім похибок, що виникають при підсумовуванні прямокутників, побудованих на хордах, додаються похибки, які з'являються при вимірюванні площ сегментів кола.

Так як роздільна здатність сучасних фотоприймачів дуже висока, можна підібрати такі параметри  $\rho$  та  $N$ , для яких значення похибки не буде перевищувати величини, необхідної для даних вимірів.

При вимірюванні периметрів фігур, форма яких близька до прямокутної, похибка залежить ще й від орієнтації фігури відносно рядків сканування. Якщо сторона прямокутника складає з лініями сканування кут в  $15^\circ$ , то похибку у визначенні його периметра нескладно порахувати

$$\delta_L = \frac{4\rho(n-1) - 2(n-1)\sqrt{2}\rho}{2\sqrt{2}\rho(n-1)} = 0,39. \quad (12)$$

Величина похибки  $\delta_L$  завжди позитивна і не залежить від розмірів фігури, вона залежить лише від кута з лініями сканування.

При обчисленні периметрів фігур, близьких до круглої форми, для  $i$ -го рядка похибка може бути визначена як різниця між  $(a_i - a_{i+1}) + \rho$  та дугою  $l_i$  (рис. 1)

$$\sigma_{Li} = \left[ \sin \arccos \frac{r-i\rho}{r} - \sin \arccos \frac{r-(i-1)\rho}{r} \right] + \rho - r \left[ \arccos \frac{r-i\rho}{r} - \arccos \frac{r-(i-1)\rho}{r} \right]. \quad (13)$$

Рішення цієї задачі в загальному вигляді виконати доволі складно, тому нами були проведені розрахунки похибок  $\sigma_{Li}$  для деяких вибраних значень радіусів малих об'єктів  $r$  та кроку квантування  $\rho$  шляхом додавання похибок окремих рядків зчитування, що можуть бути визначені за формулою (13):

$$\sigma_{Li} = 0,37 \text{ для } r = 1,5 \text{ мм;}$$

$$\sigma_{Li} = 0,35 \text{ для } r = 2 \text{ мм;}$$

$$\sigma_{Li} = 0,32 \text{ для } r = 2,5 \text{ мм.}$$

Крок квантування  $\rho$  для усіх випадків був однаковий.

Таким чином виявлено, що при збільшенні радіусів досліджуваних фігур величина похибки знижується. Оскільки орієнтація кола не залежить від положення ліній сканування, то ця похибка не призводить до розкиду в значеннях периметру одного й того ж об'єкту. Для якісного розпізнавання потрібно використовувати оптимальний алгоритм, який би значно зменшив прогнозовану кількість ймовірних помилок.

Далі після визначення основних характеристик малих об'єктів складної форми розпізнавання може виконуватися з використанням традиційних методів обробки зображень або сучасних мереж глибокого навчання. Традиційні методи, як правило, не вимагають складних історичних даних для навчання та за своєю природою неконтрольовані. Найбільш попу-

лярним інструментом для задач обробки зображень є OpenCV – відкрита бібліотека для роботи з алгоритмами комп'ютерного зору, машинним навчанням та обробкою зображень. Позитивним тут є те, що ці завдання не вимагають анотованих зображень, де люди б маркували дані вручну (для контрольованого навчання). OpenCV, будучи сучасною всеосяжною бібліотекою, охоплює широкий спектр завдань комп'ютерного зору, від базових методів обробки зображень до просунутих реконструкцій. До мінусів можна віднести обмеженість методу кількома факторами, такими як оклюзія (частково приховані об'єкти), освітлення і тіні та ефект безладу [10].

Методи глибокого навчання зазвичай залежать від контрольованого чи неконтрольованого навчання, при цьому контрольовані методи є стандартом у задачах комп'ютерного зору.

Продуктивність таких систем обмежена обчислювальною потужністю графічних процесорів. До плюсів можна віднести те, що розпізнавання об'єктів за допомогою глибокого навчання значно стійкіше до оклюзії, складних сцен, тіней та складного освітлення. Але тут потрібна велика кількість навчальних даних; процес інструкції зображень є трудомістким і дорогим. Існує багато еталонних наборів даних (MS COCO, Caltech, KITTI, PASCAL VOC, V5), які здатні забезпечити доступність позначених даних для розпізнавання [11, 12].

В останні роки розроблені такі моделі розпізнавання як SSD, R-FCN, Faster R-CNN, Mask R-CNN та YOLO, в архітектурі яких можна побачити багато покращень та досягнень у методологіях виявлення об'єктів.

Наприклад, дуже популярною є швидка модель розпізнавання Faster R-CNN, що являє собою комбінацію між моделлю RPN і моделлю Fast R-CNN. Її можна використати для швидкого розпізнавання дрібних об'єктів складної форми.

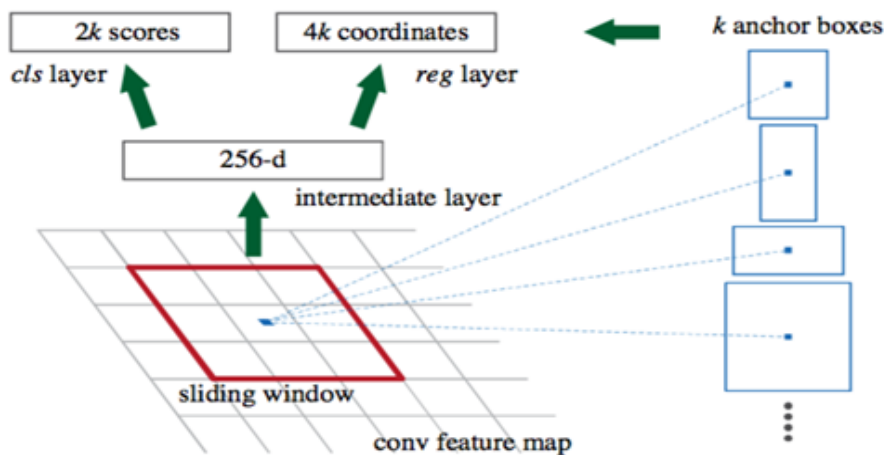


Рис. 2. Принцип роботи моделі Faster R-CNN

Модель CNN приймає в якості вхідних даних все зображення об'єкту і створює карти характеристик. Вікно розміром  $3 \times 3$  ковзає по всіх картах об'єктів і виводить вектор ознак, пов'язаний з двома повністю з'єднаними шарами, один для блокової регресії та один для блокової класифікації.

Коли блоки прив'язки виявлені, вони вибираються шляхом застосування порога до показника об'єктивності, щоб залишити тільки відповідні блоки. Ці блоки прив'язки та карти об'єктів, обчислені вихідною моделлю CNN, і подають модель Faster R-CNN.

Найкращі Faster R-CNN отримали оцінки mAP 78,8% порівняно з набором даних тесту PASCAL VOC 2007 року та 75,9% порівняно з набором даних тесту PASCAL VOC 2012 року. Оцінка mAP застосовується для отримання точкової оцінки неспостережуваної величини на базі емпіричних даних і пов'язана з методом максимальної правдоподібності, використовується для порівняння ефективності різних методик розпізнавання.

При цьому розпізнавання об'єктів вже не обмежується статичними зображеннями, оскільки воно може ефективно виконуватися на відеокадрах у реальному часі та з високою точністю.

Питання виявлення та класифікації об'єктів методами глибокого навчання широко визнано дослідниками та використовується компаніями, які займаються комп'ютерним зором для створення комерційних продуктів.

## Висновки

1. Розпізнавання об'єктів, як і раніше, залишається однією з найважливіших сфер застосування для систем навчання та комп'ютерного зору на сьогоднішній день, при цьому у методологіях виявлення об'єктів можна побачити багато покращень та досягнень, це стосується як традиційних методів обробки зображень, так і сучасних мереж глибокого навчання.

2. Автоматичні системи розпізнавання, що працюють за даною методикою, дозволяють досліджувати різноманітні об'єкти, відрізняються достатньо високою швидкістю, але у зв'язку зі складністю їх використання в реальному часі виправдане лише у тих випадках, коли ці об'єкти мають складну форму й не можуть бути розпізнані та класифіковані звичайними більш простими методами та засобами.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Система технічного зору: особливості, завдання, принципи роботи, основні компоненти [Електронний ресурс]- Режим доступу: <http://bigbro.com.ua/sistematehnicnogo-zoru-osoblivosti-zavdannya-printsipi-roboti-osnovni-komponenti/>.
2. Антонюк В.С., Вислоух С.П., Катрук О.В. Класифікація розпізнавання образів при автоматизованому проектуванні технологічних процесів. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ–Київ, Вип. № 23, 2008. – С. 176–182.
3. David Forsyth - Computer Vision: A Modern Approach. – 2004. – 928 с.
4. Multi-scale Template Matching using Python and OpenCV by Adrian Rosebrock [Електронний ресурс]- Режим доступу: <https://www.pyimage.com/2015/01/26/multi-scale-template-matching-usingpython-opencv/>.
5. Hastie T. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. – 2nd ed, 2009p. – 746 с.
6. Довбиш А. С. Основи теорії розпізнавання образів : навч. посіб. : у 2 ч. / А. С. Довбиш, І. В. Шелехов. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – Ч. 1. – 109с.
7. Зайченко Ю. П. Основи проектування інтелектуальних систем: навчальний посібник / Ю. П. Зайченко. – К. : 106 Видавничий Дім «Слово», 2004. – 352 с.
8. Hastie T. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. – 2nd ed. / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman. – Springer-Verlag, 2009. – 746 p.
9. Han J. Data mining: concepts and techniques. J. Han, M. Kamber, J. Pei. – Morgan Kaufmann / Elsevier, 2012. – 744 p.
10. What is OpenCV? The Complete Guide [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://viso.ai/computer-vision/opencv/>.
11. The PASCAL Visual Object Classes Homepage [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://host.robots.ox.ac.uk/pascal/VOC/>.
12. What is the COCO Dataset? [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://viso.ai/computer-vision/coco-dataset/>.

Received (Надійшла) 18.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.11.2023

## Methods of complex objects automatic recognition by form

N. Yermilova, Y. Zourab, R. Iermilov

**Abstract.** The analysis of literary sources shows that the need to recognize both large and small objects is an important direction in the development of robots' technical vision modern systems and other automation technical means, which must be able to recognize any object that has fallen into their field of vision by the measured values of attributes, assign it to a certain class, make a decision, and issue a command to the robot's manipulators. The article considers approaches to recognition with the subsequent classification of small objects by such features as the coefficient of ellipticity and the form complexity coefficient. By identifying features and their combinations for identifying similar objects, you can train a machine learning model to recognize the necessary types of patterns. A comparison of the measuring methods the areas of the projections of objects whose shape is close to rectangular, objects of a round shape, and objects that represent a long, elongated figure of a complex shape is carried out. The accuracy of measurement of area and perimeters of complex figures is estimated, errors of selected values of radii of small objects are determined depending on quantization step. The possibility of recognizing objects using traditional image processing methods or modern deep learning networks is considered: an open library for working with algorithms for computer vision, machine learning and image processing OpenCV, the latest recognition models SSD, R-FCN, Faster R-CNN, Mask R-CNN and YOLO, in the architecture of which you can see many improvements and advances in methodologies detection of objects. The advantages of using the popular Faster R-CNN recognition model, which is a combination of RPN and Fast R-CNN models, for fast recognition of small objects of complex shape are shown. It is concluded that automatic recognition systems that work according to this technique, allow to explore a variety of objects, have a sufficiently high speed, but due to the complexity of their use in real time is justified only in cases when these objects have a complex form and cannot be recognized and classified by common simpler methods and means.

**Keywords:** recognition, object classification, ellipticity coefficient, form complexity coefficient, measurement accuracy.

А. О. Зуєв, Д. Г. Караман

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

## ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ АЛГОРИТМІВ ГЕНЕРАЦІЇ ПСЕВДОВИПАДКОВИХ ЧИСЕЛ НА ПЛАТФОРМАХ ДЛЯ ВБУДОВАНИХ СИСТЕМ

**Анотація.** У статті проведено аналіз програмних реалізацій різних алгоритмів генерації псевдовипадкових чисел (ПВЧ) та псевдовипадкових бітових послідовностей (ПВБП), придатних для використання в складі вбудованих систем із обмеженими ресурсами: пристроїв Інтернету речей (IoT), бездротових сенсорних мереж (WSN), комплексів радіозв'язку малого радіусу дії та радіочастотної ідентифікації тощо. Виконано короткий огляд і аналіз існуючих платформ для розробки вбудованих систем, серед яких обрано рішення для проведення досліджень. Здійснено аналіз вимог до алгоритмів генерації ПВЧ, які підходять для реалізації у складі елементів систем із обмеженими ресурсами. Обрано найбільш характерні представники різних класів алгоритмів, реалізація яких буде найбільш доцільною. Проведено експериментальні дослідження, результати яких повинні допомогти розробникам у виборі найбільш підходящого алгоритму для генерації псевдовипадкових чисел у складі систем із обмеженими ресурсами.

**Ключові слова:** псевдовипадкові числа та бітові послідовності, генератори ПВЧ, вбудовані системи з обмеженими ресурсами, пристрої IoT, криптографічні алгоритми, ESP32.

### Вступ

Розвиток і поширення вбудованих систем, таких як, наприклад, пристроїв Інтернету речей (IoT), забезпечує їх глибоке проникнення в різні сфери діяльності людини: сільське господарство, побутова і комунальна сфера, промисловість, медицина. За оцінками провідних експертів у галузі [1], до початку 20-х років кількість розумних пристроїв, організованих в єдину мережу по всьому світу, має досягти майже 30 мільярдів, а в сферах, де пристрої об'єднуються в мережу та взаємодіють між собою без участі людини, — понад 15 мільярдів одиниць. Такий високий рівень інтеграції вбудованих систем у критично важливі галузі призводить до необхідності забезпечення цих пристроїв надійними засобами захисту інформації.

Існує практика застосування традиційних, добре перевірених, відточених засобів і алгоритмів криптографічного захисту даних, які використовуються в дротових та бездротових мережах загального призначення [2, 3]. Однак ці методи були розроблені для роботи в умовах без обмежень ресурсів на високопродуктивних обчислювальних системах. Більшість з них для виконання завдання вимагає великої кількості обчислень і оперує числами великої розрядності. У той же час, основні платформи для вбудованих систем будуються на мікропроцесорах і мікроконтролерах з невеликою продуктивністю, розрядністю, об'ємом пам'яті, а кінцеві рішення на їх основі мають ряд додаткових обмежень, наприклад, змушені працювати від автономного джерела живлення невеликої потужності і не мають можливості регулярного обслуговування для його підзарядження чи заміни. За таких умов пристрої змушені працювати в економному режимі, використовуючи короткі, адаптовані під архітектуру обчислення, що вимагають невеликого обсягу пам'яті, готові до частих і тривалих переходів базової платформи в різні енергозберігаючі режими роботи.

Такий стан справ уже протягом понад півтора десятиріч активно надихає фахівців з криптографії та інформаційної безпеки на розробку нових та адап-

тацію існуючих рішень щодо захисту даних. Ці рішення повинні бути придатні для використання вбудованими системами із обмеженими ресурсами, а водночас забезпечувати криптографічний захист на рівні, який не поступається традиційним засобам.

Розв'язання основних завдань із захисту даних для вбудованих систем передбачає реалізацію цілого комплексу криптографічних перетворень. Методи криптографічного захисту використовуються для шифрування (забезпечення конфіденційності) даних, що зберігаються та передаються, виконання необхідних процедур з встановлення та підтримки захищених каналів зв'язку, ідентифікації та аутентифікації абонентів і таке інше. Одним з найважливіших елементів цього комплексу є генератори випадкових/псевдовипадкових чисел та бітових послідовностей.

### Формулювання проблеми

У відповідності до принципу Керхгоффа, стійкість криптографічної системи захисту інформації повинна визначатися ключем шифрування. Ключ шифрування повинен бути достатньо великим і максимально непередбачуваним для злоумисника, щоб зробити завдання його відбору практично неможливим. Генерація подібних ключів — одне з завдань, яке мають виконувати генератори випадкових чисел та бітових послідовностей (ГВЧ і ГВБП). До завдань для ГВЧ (ГВБП) також входить генерація заповнень, одноразових послідовностей (nonce), так званої "солі", яка використовується для підвищення надійності зберігання паролів. У рідких випадках генератори псевдовипадкових бітових послідовностей можуть використовуватися як джерело гами шифру для здійснення потокового шифрування.

У будь-якому випадку генератор повинен відповідати жорстким вимогам щодо якості генерованих чисел або послідовностей з точки зору статистичних та кореляційних залежностей, а також бути безпечним з точки зору криптографії. Його механізм генерації повинен бути побудований таким чином, щоб з вихідної послідовності будь-якої довжини було не-

можливо відновити параметри налаштувань чи початкові значення стану генератора (вектори ініціалізації), а також неможливо передбачити наступні значення біт в послідовності чи наступні вихідні числа. Це досягається за рахунок використання станів, розмір яких значно перевищує розрядність вихідних значень, а також за рахунок багаторазового циклічного застосування досить складних перетворень. Такі заходи вступають у конфлікт з основними вимогами до методів, призначених для реалізації вбудованих систем: мінімальна обчислювальна складність, висока ефективність та швидкодія на наявних обмежених ресурсах, а також мінімізація енергоспоживання. У кінцевому підсумку розробник повинен уважно і зважено підходити до вибору генератора випадкових чисел, що буде реалізовано в системі, спираючись на дані досліджень статистичної та криптографічної надійності розглянутих кандидатів, а також на досвід їхньої реалізації для вбудованих систем.

**Основною метою статті** є аналіз ефективності та продуктивності програмних реалізацій обраних алгоритмів генерації псевдовипадкових чисел та бітових послідовностей для найбільш популярних і важливих платформ для побудови вбудованих систем в складі IoT.

### Аналіз існуючих та перспективних рішень

В останній час було опубліковано багато оглядових публікацій, які розглядають питання використання різних методів генерації псевдовипадкових чисел (ГПВЧ) та бітових послідовностей (ГПБП) у системах IoT. Більшість з них стосується основних аспектів використання ГПВЧ для різних криптографічних цілей. У роботі [4] розглядаються різні методи отримання випадкових чисел, а також перспективи їх використання для систем IoT. Основний акцент робиться на алгоритмах, придатних для програмної реалізації в складі вбудованого програмного забезпечення чи операційних систем для IoT. Особлива увага приділяється криптографічній безпеці запропонованих рішень. Проведено якісні дослідження та оцінка результатів роботи розглянутих методів генерації випадкових чисел і послідовностей за допомогою різних пакетів спеціалізованих тестів. У статті [5] проведено детальний аналіз задач в системах IoT, для яких необхідне використання генераторів випадкових чисел. Для кожної задачі пропонується найбільш підходяще рішення, в зв'язку з чим автори докладно аналізують і оцінюють різні способи отримання випадкових та псевдовипадкових чисел. Виконаний огляд можна використовувати як рекомендацію та стартову точку при виборі або розробці генератора випадкових чисел під конкретну задачу для систем з обмеженими ресурсами. Також у статті розглянуті методи оцінки роботи генераторів випадкових чисел в складі систем, основні складнощі, які можуть виникнути при програмній чи апаратній реалізації генератора, а також способи їх вирішення. Деякі огляди присвячені аналізу використання ГПВЧ та ГПБП лише з точки зору криптографії та кібербезпеки. Наприклад, у роботі [6] автори провели широкий огляд публікацій, присвячених розробці, вибору та використанню генераторів псевдовипадкових чисел у складі вбудованих

систем з певними обмеженнями, такими як пристрої IoT, вузли безпроводних сенсорних мереж (WSN), пристрої ідентифікації радіочастот (RFID) і т. д. У статті [7] проведений огляд основних методів отримання псевдовипадкових чисел та їх застосування в галузі забезпечення кібербезпеки. Проаналізовано характеристики методів та сфери їх застосування, зокрема в області криптографічного захисту та кібербезпеки, а також для використання у складі систем IoT. Розглянуті методи оцінки якості вихідних послідовностей і чисел, надано описи основних програмних інструментів, які можна використовувати для цього. В багатьох дослідженнях пропонується практичні реалізації генераторів для використання у вбудованих системах. Наприклад, у роботі [8] запропоновано невибагливий генератор псевдовипадкових чисел Arrow, який належить до сімейства генераторів Trifork. Цей генератор базується на основі двох взаємопов'язаних генераторів Фібоначчі з запізненням (LFG), а також з внутрішнім взаємним перемішуванням. За заявами авторів, він підходить для широкого спектру завдань в галузі IoT. Проведено оцінку апаратних витрат у випадку, якщо алгоритм реалізується у інтегральному вигляді за технологією CMOS, та оцінку ресурсів, витрачених на програмну реалізацію для деяких пристроїв з екосистеми Arduino. Останнє показує не дуже високий рівень продуктивності, але, тим не менш, може бути прийнятною для деяких типів пристроїв, які працюють на невеликій тактовій частоті, наприклад, пристроїв радіочастотної ідентифікації (RFID). У роботі [9] представлено два варіанти генераторів псевдовипадкових чисел, що ґрунтуються на методах Блум-Блум-Шуба (BBS), Xorshift та конгруентній генерації псевдовипадкових чисел з перестановкою. Один варіант пропонується використовувати для цілей загального призначення, тоді як другий — для пристроїв IoT в умовах суворо обмеженого енергоспоживання. Апаратні реалізації обох методів на базі програмованої логіки FPGA показали прийнятні характеристики за енергоспоживанням та продуктивністю. Однак не у кожній системі в складі IoT може бути доцільно використовувати FPGA у якості основної платформи. Також, розробка систем з використанням програмованих логічних мікросхем вимагає спеціальної кваліфікації від розробника та є досить коштовною. Перевірка програмних реалізацій для найбільш популярних платформ вбудованих систем не проводилась. Хоча в роботі зазначається можливість використання запропонованих методів у галузі кібербезпеки, самі алгоритми не відносяться до класу криптографічно безпечних, що на практиці суттєво обмежує область їх можливого використання. У статті [10] описано практичний спосіб реалізації генератора випадкових чисел на базі доступних та недорогих компонентів. Генератор побудований за комбінованою схемою, де апаратна частина відповідає за формування джерела ентропії на основі оцифрованих образів непередбачуваних сигналів з навколишнього середовища, а програмна частина виконує додаткову обробку даних джерела ентропії. Автори не наводять даних щодо результатів синтезу і моделювання запропонованої схеми, а також не проводять хоча б статистичну оцінку генерованої послідовності. Іноді для побудови генера-

торів пропонується використовувати досить складні та навіть екзотичні методи. Наприклад, у статті [11] розглядається метод побудови генераторів послідовностей де Брейна на базі зсувних регістрів з нелінійними зворотними зв'язками (NLFSR). Запропонований авторами метод дозволяє синтезувати генератори псевдовипадкових чисел з послідовностями максимальної довжини для заданої розрядності зсувного регістра. Такі генератори особливо актуальні в системах захисту інформації, оскільки вони вимагають мінімальних ресурсів для реалізації і при цьому забезпечують більш якісну послідовність вихідних бітів, яка є значно менш передбачуваною ніж у регістрів з лінійними зворотними зв'язками. Описана в роботі схема дозволяє отримати генератор, але не дає ніякої перевірки результатів його роботи та оцінки криптографічної надійності запропонованого рішення. У статті [12] запропоновано метод побудови генератора псевдовипадкових чисел на основі хаотичних відображень. Якість отриманої випадкової послідовності додатково поліпшується за допомогою застосування функції приведення за модулем та перевіряється за допомогою набору математичних та статистичних тестів. Алгоритм шифрування використовує запропонований генератор псевдовипадкових чисел для захищеного передавання кольорових зображень, отриманих кінцевими пристроями в мережі IoT, за протоколом MQTT через бездротові канали зв'язку та Інтернет. Окрім стандартної оцінки якості випадкової послідовності, автори провели ряд криптоаналітичних досліджень запропонованої ними криптосистеми (побудова статистичних гістограм, оцінка

ентропії та ключового простору, кореляція сусідніх відліків, диференційний криптоаналіз), проте ці дослідження не підтверджують криптографічну безпеку запропонованого алгоритму отримання псевдовипадкової послідовності.

### Вибір та обґрунтування цільової платформи

Після проведення аналізу перспективних платформ для реалізації вузлів для різних типів вбудованих систем із обмеженими ресурсами (таблиця 1), серед усіх кандидатів особливо увагу звернули на себе комплекти розробки на основі мікроконтролера ESP32. ESP32 — це багатофункціональна система на кристалі (SoC), розроблена Espressif Systems — китайською компанією, що базується у Шанхаї. ESP32 позиціонується як автономне рішення для організації бездротових мереж Wi-Fi, яке може організувати підключення будь-якого стороннього мікроконтролерного пристрою (МК) до Wi-Fi, а також здатне виконувати програми автономно на вбудованому МК [13]. До позитивних особливостей цієї платформи можна віднести низьку ціну, велику потужність, вбудований МК має 3 ядра, 2 з яких працюють на частоті до 240 МГц [14], а також багато різних апаратних модулів для вводу-виводу включаючи Wi-Fi та Bluetooth, що відкриває великі можливості для застосування цієї платформи для виготовлення різних пристроїв IoT [15]. ESP32 підтримується різними популярними середовищами розробки, такими, як Arduino, PlatformIO, або може програмуватися за допомогою фреймворку ESP-IDF від виробника МК.

Таблиця 1 – Зведені характеристики популярних платформ для вбудованих систем

Пристрій	ЦП	ОЗП	ПЗП (Flash)	Wi-Fi	Лінії вв./вив.	ОС	Вартість
Arduino	8-20 МГц	1-8 КБ	16-256 КБ	ні	14-54	N/A	\$6-25
ESP8266	80 МГц	80 КБ	512 КБ	так	9	FreeRTOS	\$3-12
ESP32	160 МГц	512 КБ	4-16 МБ	так	43	FreeRTOS	\$5-15
RPi Pico (W)	133 МГц	256 КБ	2-16 МБ	ні (так)	26	N/A	\$6-12
Omega2	580 МГц	64 МБ	16 МБ	так	12	Linux	\$22
RPi Zero (W)	1 ГГц	512 МБ	16-32 ГБ	ні (так)	40	Linux	\$15-20
C.H.I.P.	1 ГГц	512 МБ	4-8 ГБ	так	45	Linux	\$50

Платформа ESP32 використовується для отримання та обробки даних з сенсорів [16], для керування сонячними панелями та системами іригації [17], для систем розумних будинків та систем контролю якості повітря [18], [19], а також для контролю систем життєдіяльності людини [20].

### Характеристики досліджуваних алгоритмів генерації ПВЧ

На основі результатів аналізу існуючих рішень було обрано три алгоритми генерації ПВЧ: алгоритм Xoroshiro128++ (версія 1.0), алгоритм ISAAC, а також алгоритм потокового шифрування Salsa20, що може працювати в режимі генератора ПВЧ. Такий перелік можна пояснити наступним чином. Жоден з розглянутих методів не входить до складу стандартних або спеціалізованих бібліотек для створення програмного забезпечення для розглянутих платформ, тому, якщо в завданні з проектування був вказаний один із вибраних

алгоритмів, розробнику довелося б створювати відповідне програмне забезпечення самостійно. Алгоритм Xoroshiro128++ не відноситься до числа криптографічно безпечних, але за іншими критеріями є одним із найбільш перспективних генераторів для систем з обмеженими ресурсами. Інші два алгоритми є криптографічно безпечними, причому алгоритм Salsa20, по суті, є алгоритмом потокового шифрування, який, за необхідності, можна використовувати як генератор ПВЧ.

Алгоритм генерації псевдовипадкових чисел Xoroshiro128++ дозволяє отримувати рівномірно розподілені 32-бітні цілі числа без знаку. Він був розроблений Себастьяном Вігна разом із Девідом Блекманом як один із варіантів у загальному сімействі алгоритмів xoshiro/xoroshiro [21]. Алгоритм побудований за допомогою трьох основних операцій: побітового виключного-АБО (xor), лінійного (shift) та циклічного (rotate) зсувів. Число в назві позначає розрядність внутрішнього стану. Існують також версії з 256-бітовим, 512-

бітовим та 1024-бітовими станами, проте саме генератор із 128-бітовим станом рекомендується для використання у вбудованих системах з обмеженими ресурсами. Генератори цього сімейства вже активно використовуються як стандартні для багатьох мов програмування та програмних бібліотек (Java, JavaScript, .NET, Rust, Lua, Julia), а також є генераторами за замовчуванням у операційних системах Mbed та Zephyr, спеціально розроблених для застосування в IoT [22].

Алгоритм ISAAC (скорочення від Indirection, Shift, Accumulate, Add, and Count) — криптографічно безпечний генератор псевдовипадкових чисел, розроблений Робертом Дженкінсом у 1993 році [23]. Структура алгоритму у багатьох відношеннях подібна до алгоритму потокового шифрування RC4, який іноді також використовується як генератор ПВЧ. Алгоритм містить масив з 256 32-розрядних цілих чисел як внутрішній стан, який частково змішується кожного разу під час генерації наступного числа. Для отримання випадкового числа з масиву обираються 2 числа з довільним значенням лічильника зі зсувом на 128 позицій одне відносно одного. Отримання результату відбувається приблизно за 19 операцій над 32-розрядними числами, що є досить швидким для 32-розрядних платформ. Основним недоліком алгоритму є відносно великий розмір стану для систем з обмеженими ресурсами, для його зберігання потрібно виділити постійно приблизно 1 КБ пам'яті, а також досить тривала процедура початкової ініціалізації. Однак сам робочий процес дуже швидкий та оптимізований для 32-розрядної архітектури, сам генератор є криптографічно безпечним: вихідні значення не виявляють жодних статистичних залежностей або закономірностей, за будь-якою послідовністю вихідних значень неможливо відновити початковий внутрішній стан, ймовірність виникнення коротких циклів є мізерною.

Алгоритм Salsa20 був розроблений Деніелом Бештейном, перш за все, як потоковий шифр, приблизно у 2005 році [24]. Він був представлений на конкурсі вибору кращих алгоритмів шифрування eSTREAM, який відбувся з 2004 по 2011 рік, і у результаті увійшов до числа фіналістів. Тим не менше, алгоритм може бути також використаний для отримання ПВЧ: його структура побудована на принципі ГПВЧ, які використовують набір операцій "додавання" (add), "циклічний зсув" (rotate), "виключне-АБО" (xor) над 32-розрядними операндами. Алгоритм використовує як початкові параметри 128- або 256-бітний ключ, 64-бітне значення вектора ініціалізації та 64-бітне значення лічильника. Далі всі дії виконуються над 512-бітним внутрішнім станом. Один етап отримання кінцевого результату в алгоритмі Salsa20 займає 20 циклів проходження по внутрішньому стану, після кожного другого виконується додаткова операція незворотного перемішування. Однак для генерації псевдовипадкових чисел можна використовувати спрощену версію алгоритму на 8 циклів. Під час виконання етапу створюється копія стану із зміненими даними, так що на момент виконання алгоритм потребує мінімум 128 байтів (1 Кбіт) оперативної пам'яті, проте між етапами достатньо зберігати лише поточний стан у 64 байта (512 біт). Якщо реалізація алгоритму Salsa20 є обов'яз-

ковим компонентом криптографічного стеку вбудованого пристрою, то використання алгоритму у повному чи скороченому варіанті як генератора ПВЧ дозволить суттєво економити пам'ять, а також дозволить отримати швидкий і надійний ГПВЧ.

### Особливості реалізації та вибір мови програмування

Тест вимірювання швидкості є складним з багатьох причин. Вимірювання за допомогою вбудованого годинника МК може бути недостатньо точним через невисоку тактову частоту роботи пристрою. Деякі МК мають розвинуті можливості до паралелізму, таким чином відстеження початку і завершення виконання інструкцій є дещо недетермінованим і сильно залежить від інших подій. Сучасні процесори мають механізм зміни робочої частоти: вони цілеспрямовано стають повільнішими або швидшими, залежно від потреби здійснення обчислень: при відсутності навантаження або при виконанні певних команд вони можуть значно знижувати робочу частоту, що знижує енергоспоживання і подовжує можливий час роботи від обмеженого джерела живлення.

Ще одним важливим аспектом є вибір мови програмування для реалізації програми на МК. Зазвичай, цей вибір обумовлено підтримкою допоміжного апаратного забезпечення та периферійних пристроїв, таких, як інтерфейс введення/виведення сигналів загального призначення (GPIO), аналогові входні лінії та аналого-цифрові перетворювачі сигналів (ADC), провідні цифрові інтерфейси (SPI, I2C) та комунікаційні модулі (Wi-Fi, Bluetooth), які потрібні для вирішення задачі. Розробники МК майже завжди пропонують використовувати певні бібліотеки абстрактного уявлення апаратних ресурсів (HAL) для доступу до певних регістрів і периферійних пристроїв для деяких мов програмування (здебільшого це C/C++). Іншим аспектом є підтримка тої чи іншої мови високого рівня. Дуже часто занадто складні можливості мови програмування високого рівня обмежені або взагалі не реалізовані у версії компілятора для вбудованих апаратних платформ. Важливо також брати до уваги компілятор та інструменти, які будуть використовуватися для компіляції коду. Для вбудованих середовищ дуже важливою є здатність оптимізувати не тільки продуктивність скомпільованого застосунку, а ще й розмір його коду.

Виконання коду здійснюється під керуванням операційної системи, яка також виконує деякі інші завдання, наприклад обробку подій прийнятно-передавальних пристроїв, таких як модулі Wi-Fi або Bluetooth/BLE. Все це може приводити до варіативності часу виконання однакового коду.

Найбільш доцільнішим для реалізації алгоритмів та програм тестування ГПВЧ у відповідності до зазначених умов буде обрання мов програмування C/C++. Розробка на цих мовах програмування може здійснюватися для більшості платформ, вони забезпечують прямий контроль над розподілом пам'яті, а також для цих мов є необхідні бібліотеки, які підтримують обладнання та периферійні пристрої. Для порівняння, мова Python (MicroPython) не забезпечує



контроль за розподілом пам'яті, та має дещо низку продуктивність, а мова Go (TinyGo) також не має підтримки бездротових периферійних модулів (Wi-Fi та BLE) на платформі ESP32.

### Тестування на платформі ESP32

Тестування проводилося на платформі MCU ESP32-WROOM v3.1: частота процесору 160МГц, програмне оточення ESP-IDF 5.01.0001. Програма написана на мові C++, компілювалася за допомогою компілятора GCC з налаштуванням на продуктивність (Optimize for performance -O2). Програма завантажувалась до Flash пам'яті МК та виконувалась під керуванням ОС FreeRTOS [25] з часом квантування 1 мс.

Було проведено заміри часу виконання 1 мільйону операцій генерації випадкових чисел розрядністю 32 біти за допомогою різних генераторів rnd(). Отримані числа додавалися до лічильника counter який гарантовано було розташовано у динамічній пам'яті МК (атрибут DRAM\_ATTR), за допомогою операції "виключне-АБО". Це потрібно для того щоб компілятор при оптимізації програми не відкидав виклики функцій результат яких не використовується. Шаблон коду для тестування:

```
static uint32_t DRAM_ATTR counter = 0;
void test(int steps)
{
    counter = 0;
    for(int i = 0; i < steps; ++i)
    {
        counter ^= rnd();
    }
}
```

Вимірювання часу виконувалося за допомогою внутрішнього лічильника МК (функція esp\_timer\_get\_time()) з роздільною здатністю до 1 мкс. Також було виміряно час виконання циклу за шаблоном без генерування чисел, і отриманий час віднімався від вимірюваного по кожному генератору, для того щоб прибрати частку, яку безпосередньо не займає генерація (вона сягає в середньому 6304 мкс). Додатково було виміряно час, який потрібен для отримання значення з внутрішнього лічильника МК (він становить приблизно 1 мкс), і з'ясовано, що він суттєво не впливає на результати тестування. Всі тести запускалися з одного потоку операційної системи. Всі модулі МК (Wi-Fi, BLE та ін.), які потребують додаткових процесів ОС були відключені. Заміри часу для початкової ініціалізації генераторів випадкових чисел не проводилися, та час, потрібний на її виконання, в кінцевих результатах не враховувався. Всі змінні, необхідні для зберігання стану генераторів, також були розташовані у динамічній пам'яті МК (за допомогою вказання атрибуту DRAM\_ATTR), або на стеку, для того щоб зменшити вплив затримки запиту даних з різних видів пам'яті МК. Результати тестування наведено у табл. 2.

Додатково було проведено тестування програмних реалізацій алгоритмів на частоті 240МГц, в якому з'ясовано, що для апаратного генератора випадкових чисел кількість циклів для отримання одного числа збільшилася з 118 до 126, а для решти методів залишилася незмінною, час отримання одного числа зменшився у 1.5 рази, що є пропорційним збільшенню частоти.

Таблиця 2 – Результати порівняння швидкодії різних ГВЧ на ESP32 (1 ядро, 160 МГц)

№	Тип генератора	Середній час виконання 1 млн. операцій, мкс	Час генерування 1 числа, мкс	Час генерування 1 числа, тактів
1	Порожній цикл	6304	0.006	1
2	Апаратний генератор випадкових чисел	744610	0.738	118
3	Вбудований генератор псевдо-випадкових чисел мови C++ (LCG/MT19937/SWC)	795060	0.789	126
4	Xoroshiro128++ 1.0	157369	0.151	26
5	ISAAC	329962	0.324	52
6	Salsa20	1019197	1.013	162

### Аналіз ефективності та висновки

У даній роботі було виконано аналіз існуючих методів отримання псевдовипадкових чисел та бітових послідовностей для вбудованих пристроїв у складі систем з обмеженими ресурсами: систем IoT, мереж бездротових сенсорів, та пристроїв загального призначення з автономним живленням, які здатні об'єднуватись у локальні бездротові мережі. На базі проведеного аналізу було сформовано основні висновки до таких методів. Разом з тим було розглянуто основні найбільш вживані платформи для реалізації пристроїв у складі систем з обмеженими ресурсами та обрано найбільш перспективну з них. Проведене експеримен-

тальне дослідження реалізації типових алгоритмів для отримання псевдовипадкових чисел показало що Xoroshiro128++ та ISAAC є найбільш продуктивнішими алгоритмами, які випереджають вбудований ГПВЧ в 4.8 – 2.4 рази. Отримані результати дозволяють зробити свідомий вибір алгоритму генерації псевдовипадкових чисел за необхідності їх реалізації у пристроях з обмеженими ресурсами. Слід зазначити, що, час виконання обраних алгоритмів для тестування, практично не змінювалися на протязі тестових запусків (похибка складала не більше 5 мкс). Окрім вбудованого ГПВЧ, для якого коливання часу складало до 100 мкс, що обумовлено особливостями реалізації доступу до змінних, які він використовує.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Shafique K., Khawaja B. A., Sabir F., Qazi S., Mustaqim M. "Internet of Things (IoT) for Next-Generation Smart Systems: A Review of Current Challenges, Future Trends and Prospects for Emerging 5G-IoT Scenarios," in IEEE Access, vol. 8, pp. 23022-23040, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970118.

2. Yang Y., Wu L., Yin G., Li L., Zhao H. "A Survey on Security and Privacy Issues in Internet-of-Things," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 4, no. 5, pp. 1250-1258, Oct. 2017, DOI: 10.1109/IIOT.2017.2694844.
3. Совин Я. Р., Наконечний Ю. М., Опірський І. Р., Стахів М. Ю. Аналіз апаратної підтримки криптографії у пристроях інтернету речей / Безпека інформації, Том 24 № 1 (2018), с. 36-48. DOI: 10.18372/2225-5036.24.12491
4. Kietzmann P., Schmidt T.C., Wählisch M. Kietzmann P., Schmidt T.C., Wählisch M. "A Guideline on Pseudorandom Number Generation (PRNG) in the IoT", ACM Computing Surveys (CSUR), Volume 54, Issue 6, 2020. pp. 1-38. DOI: 10.1145/3453159
5. Kübra Seyhan, Sedat Akleylek. "Classification of random number generator applications in IoT: A comprehensive taxonomy", Journal of Information Security and Applications, Vol. 71, Issue C, Dec 2022, DOI: 10.1016/j.jisa.2022.103365
6. Orue A. B., Hernandez-Encinas L., Fernandez V., Montoya F. "A review of cryptographically secure PRNGs in constrained devices for the IoT", International Joint Conference SOCO'17-CISIS'17-ICEUTE'17 León, Spain, 2017, Publ. in Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 649. Springer, Cham. pp. 672-682. DOI: 10.1007/978-3-319-67180-2\_65
7. Хомік М. А., Гарасимчук О. І. Застосування генераторів псевдовипадкових чисел та послідовностей в кібербезпеці, методи їх побудови та оцінки якості. Захист інформації. Т. 25 № 3 (2023). С. 147-159. DOI: 10.18372/2410-7840.25.17940
8. Orue A., Hernandez E. L., Martín A., Vitini F. "A Lightweight Pseudorandom Number Generator for Securing the Internet of Things", IEEE Access, vol. 5, pp. 27800-27806, 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2774105
9. Bikram Paul, Apratim Khobragade, Soumith Javvaji Sai, Sushree Sila P. Goswami, Sunil Dutt, Gaurav Trivedi. "Design and Implementation of Low-Power High-throughput PRNGs for Security Applications", 2019 32nd Int. Conf. on VLSI Design and 2019 18th Int. Confe. on Embedded Systems (VLSID), 2019, Delhi, India, pp. 535-536. DOI: 10.1109/VLSID.2019.00123
10. Поперешняк С. В., Райчев О. О. "Модель легкового генератора псевдовипадкових чисел для інтернету речей", Science-based technologies, 50(2), 2021, сс. 122-129. DOI: 10.18372/2310-5461.50.15670.
11. Miroschnyk M, Korytchinko T., Demihev O., Krylova V., Karaman D., Filippenko I. " Practical methods for de Bruijn sequences generation using non-linear feedback shift registers", 2018 14th Int. Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Eng. (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, pp. 1157-1161. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336400.
12. Trujillo-Toledo D. A., López-Bonilla O. R., García-Guerrero E. E., Tlelo-Cuautle E., López-Mancilla D., Guillén-Fernández O., Inzunza-González E. " Real-time RGB image encryption for IoT applications using enhanced sequences from chaotic maps", Chaos, Solitons & Fractals, Volume 153, Part 2, December 2021, 111506. DOI: 10.1016/j.chaos.2021.111506
13. ESP32 Technical Reference Manual. Version 5.0 Espressif Systems Copyright © 2023. <https://www.espressif.com>.
14. ESP32 Series Datasheet. Version 4.3 Espressif Systems Copyright © 2023. [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)
15. Maier, A.; Sharp, A.; Vagapov, Y. Comparative Analysis and Practical Implementation of the ESP32 Microcontroller Module for the Internet of Things. In Proceedings of the 2017 Internet Technologies and Applications (ITA), Wrexham, UK, 12–15 September 2017; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2017; pp. 143–148.
16. Hangan, A.; Chiru, C.-G.; Arsene, D.; Czako, Z.; Lisman, D.F.; Mocanu, M.; Sebestyen, G. Advanced Techniques for Monitoring and Management of Urban Water Infrastructures—An Overview. Water 2022, 14, 2174. DOI: 10.3390/w14142174
17. Allafi, I.; Iqbal, T. Design and Implementation of a Low Cost Web Server Using ESP32 for Real-Time Photovoltaic System Monitoring. In Proceedings of the 2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Saskatoon, SK, Canada, 22–25 October 2017; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2017; pp. 1–5.
18. Carducci, C.G.C.; Monti, A.; Schraven, M.H.; Schumacher, M.; Mueller, D. Enabling ESP32-Based IoT Applications in Building Automation Systems. In Proceedings of the 2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0&IoT), Naples, Italy, 4–6 June 2019; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2019; pp. 306–311.
19. Tastan, M.; Gökozan, H. Real-Time Monitoring of Indoor Air Quality with Internet of Things-Based E-Nose. Appl. Sci. 2019, 9, 3435. DOI: 10.3390/app9163435
20. Sangeethalakshmi, K.; Preethi Angel, S.; Preethi, U.; Pavithra, S.; Shanmuga Priya, V. Patient Health Monitoring System Using IoT. Mater. Today Proc. 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.06.188
21. Blackman D., Vigna S. "Scrambled Linear Pseudorandom Number Generators", ACM Transactions on Mathematical Software, Volume 47, Issue 4, Article No.: 36, pp. 1-32. DOI: 10.1145/3460772
22. Vigna S. "xoshiro / xoroshiro generators and the PRNG shootout", <https://prng.di.unimi.it/>
23. Robert J. Jenkins Jr. "ISAAC and RC4", 1993-1996. <http://burtleburtle.net/bob/rand/isaac.html>
24. Bernstein D.J. "The Salsa20 Family of Stream Ciphers." In: Robshaw, M., Billet, O. (eds) New Stream Cipher Designs. Lecture Notes in Computer Science, vol 4986. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-68351-3\_8
25. FreeRTOS. Available online: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/system/freertos.html> (accessed on 15 November 2022).

Received (Надійшла) 25.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.11.2023

### Software implementation of specialized algorithms for generating pseudorandom numbers on embedded systems platforms

A. Zuev, D. Karaman

**Abstract.** The article presents an analysis of software implementations of various pseudorandom number (PRN) and pseudorandom bit sequence (PRBS) generation algorithms suitable for use in embedded systems with constrained resources: Internet of Things (IoT) devices, wireless sensor networks (WSN), short-range radio communication complexes, and radio frequency identification systems, among others. A brief overview and analysis of existing platforms for embedded system development are provided, and a solution is chosen for further research. The requirements for PRN generation algorithms suitable for implementation in elements of resource-constrained systems are analyzed. The most representative algorithms from various classes are selected for implementation. Experimental research is conducted, and the results are intended to assist developers in choosing the most suitable algorithm for generating pseudorandom numbers in systems with limited resources.

**Keywords:** pseudorandom numbers and bit sequences, pseudorandom number generators, embedded systems with constrained resources, IoT devices, cryptographic algorithms, ESP32.

Д. С. Положий, О. О. Орехов

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

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ АВТОМОБІЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ НА ОСНОВІ ХМАРНИХ АРХІТЕКТУР

**Анотація.** У роботі досліджено інтелектуальні системи автомобільної безпеки на основі хмарних архітектур. Показано взаємозв'язок сучасних систем автомобільної безпеки з технологією Інтернету речей. Охарактеризовано сучасні інтелектуальні системи автомобільної безпеки. Розкрито принципи формування основних функціональних складових систем. Доведено, що безсерверні обчислення є значним зрушенням у способах створення та розгортання додатків розробниками. Наголошено, що абстрагуючи базову інфраструктуру, безсерверні обчислення дозволяють розробникам зосередитись на написанні коду та створенні функціональних можливостей. Незважаючи на деякі обмеження, переваги безсерверних обчислень, включаючи масштабованість, економічність та гнучкість, роблять їх привабливим варіантом для багатьох випадків використання у сфері автомобільної безпеки. Охарактеризовано категорії користувачів системи, це користувачі системи, постачальники послуг з оцінки відповідності, адміністратори системної платформи. Описано принципи формування мікросервісів, зазначається, що у системі автомобільної безпеки результати обмеженого контексту безпосередньо інформують підрозділ мікросервісів. Остаточна конфігурація мікросервісів складається з трьох основних доменів: домен користувача, домен реалізації та домен правила. Сформовано комплексну архітектуру платформи, яку представлено графічно з відокремленням двох основних складових фронтенду та бекенду, описано структуру багаторівневої логіки надання послуг та потік даних у системі. Зазначається, що враховуючи масштабність сучасних інтелектуальних систем автомобільної безпеки запропонована архітектура може бути інтегрована під різні системи такі як виявлення несправності в роботі автомобіля, аварійне керування авто, система підтримки швидкості, тощо. Детально описано процес інтеграції системи та принцип роботи із застосуванням датчиків різного напрямлення.

**Ключові слова:** хмара, мікросервіс, безсерверна архітектура, розподілена програма, безпека, дорога, автомобіль, інтелектуальна система.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Враховуючи сучасний розвиток логістичної системи та посилення глобалізації спостерігається прогрес у цифровізації та автоматизації всіх сфер людської діяльності. Поява технології Інтернету речей (IoT) призвела до поширення взаємозв'язаних пристроїв і систем, що охоплюють широкий спектр датчиків, інтелектуальних пристроїв і систем управління автомобільним транспортом. Значний обсяг даних, створених цими пристроями та системами, забезпечує ефективну взаємодію та обмін інформацією через Інтернет, значно прискорюючи розвиток автомобільної інформації.

З повсюдною інтеграцією технології IoT загальною та інтелектуальною автомобільною технікою зокрема, питання безпеки IoT набуло підвищеної уваги. Взаємозв'язок пристроїв і систем в рамках IoT вимагає підключення через Інтернет, за допомогою якого запити від розподілених пристроїв централізовано обробляються та відповідають на них. Однак цей централізований підхід створює вразливі місця в безпеці, включаючи мережеві атаки, витік даних, порушення конфіденційності та вразливість системи безпеки. Примітно, що у сфері інтелектуальної автомобільної техніки необхідність інформаційної безпеки та захисту стає ще більш критичною та складною через залучення зовнішніх факторів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Формування наукової думки в окресі автомобільної безпеки та впровадження технології IoT у автомобільну сферу є різноманітним та масштабним. У сучасній науковій площині з'являються роботи присвячені дослідженням хмарних сервісів та алгоритмів їх впровадження у інтелектуальні автомобільні системи.

Дослідження активних систем безпеки для автотранспортних засобів здійснили М. В. Коростельов та А. В. Гнатов [1]. Авторами проведено дослідження активних систем безпеки автомобілів на дорозі з метою вжиття заходів для підвищення безпеки учасників дорожнього руху, проаналізовано основні системи допомоги водію в активній системі безпеки автомобіля і розглянуто різні елементи для підвищення безпеки людей в автомобілі в пасивній системі безпеки. О.П. Алексієв, В.О. Алексієв, С.М. Неронов та А.Е. Дьяков [2] розглянули принципи побудови інтелектуальної транспортної системи міста. Науковці зазначають, що міста, які бажають стати розумним містом, найчастіше починають із розбудови інтелектуальної транспортної інфраструктури у формі Інтелектуальної транспортної мережі (ITN). У [3] досліджено бортові системи інтелектуального автомобіля. Авторами доведено, що для керування автомобілем потрібен обмін інформацією між окремими електронними блоками керування, тобто, роботою в мережі у тісному взаємозв'язку одного з одним. Застосовувана на автомобілях система CAN дає можливість об'єднати в локальну мережу блоки керування або складні датчики.

Із зарубіжних авторів варто відмітити роботи таких науковців як: Лінь Дяньчао, Лі Лі [4] який запропонував ефективну орієнтовану на безпеку модель слідування автомобіля для САУ з урахуванням впливу дискретних сигналів; Ван Юй, У Цзе, Хе Ханьфу [5] провели тематичне дослідження попереджувальних знаків чотирьох основних марок автомобілів у цьому сценарії та дослідили метод розробки сигналу в сценарії попередження про виїзд зі смуги руху; Сун Дунцзянь, Чжу Бінь, Чжао Цзянь, Хан Цзі, Чень Чжичен [6] запропонували стратегію контролю за автомобілем на основі гібриду навчання з підкріпленням (RL) і

навчання під наглядом (SL); Лю Ян, Фань Інці, Хуан Дарун, Мі Бо, Хуан Ліюань [7] представили практичне дослідження інтелектуального автомобіля, змодельованого стохастичними мережами Петрі та Z. Результати показують, що це може підвищити безпеку та ефективність інтелектуальної системи водіння автомобіля; Ельсамадісі Омар, Ші Тяньюй, Смирнов Ілля, Абдулхай Бахер [8] запропонували SECRM (Безпечна, ефективна та комфортна модель слідування за автомобілем на основі RL) для автономного слідування за автомобілем, яка врівноважує максимізацію ефективності трафіку та мінімізацію ривків, підпорядковуючись жорстким аналітичним обмеженням безпеки щодо прискорення; Чень Сінюй, Бай Хайцзянь, Дін Хен, Гао Цзяньше, Хуан Веньцзюань [9] на основі інтелектуальної моделі LSTM у поєднанні з моделлю безпечного уникнення зіткнень Gipps побудували нову модель Gipps-LSTM, яка може не лише вивчати розумну поведінку людей, але й забезпечувати безпеку транспортних засобів. Ідея комбінації моделей Gipps-LSTM полягає в наступному: вводиться концепція потенційної точки зіткнення (PCP), а модель LSTM або модель Gipps контролюється та запускається за допомогою алгоритму оцінки ризику; Лі Маошен, Фань Цзін, Лі Джейон [10] розширили модель CF для адаптації поведінки ручного водіння на стані різних рівнів безпеки та проаналізували потік дорожнього руху в середовищі від ручного водіння до інтелектуального водіння високого рівня з різними затримками; Ван Шуфен, Ван Сінькай, Ван Шіхао [11] розробили покращену модель еліпса автомобіля та застосували її до мінімальної безпечної відстані для вільної зміни смуги руху інтелектуальних транспортних засобів; Пен Ліцзюнь, Хуан Цзюй, Чжоу Туцянь, Сюй Шуцай [12] досліджують продуктивність транспортного потоку в широко поширеному середовищі V2V, розгорнутому для всіх типів HDV та IV, рівнях від L0 до L5. Виходячи з цього припущення, переміщення та операції транспортного засобу збираються в набір даних V2X BSM, і для будь-якого транспортного засобу в парку послідовні рухи та поведінку автомобіля попереду можна передбачити в короткостроковій перспективі та розглядати як вхідні дані для моделі кооперативного адаптивного круїз-контролю (CACC) керованого автомобіля; Кападія Рія, Мехта Куш [13] розглянули зміну парадигми, яка можлива завдяки методам глибокого навчання для отримання стабільного та надійного автономного керування для безпілотних автомобілів та інших.

Однак незважаючи на масштабність наукових досліджень питання дослідження інтелектуальних систем автомобільної безпеки на основі хмарних архітектур з подальшою розробкою адаптивної архітектури системи не викликає сумнівів.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження інтелектуальних систем автомобільної безпеки на основі хмарних архітектур з подальшою розробкою адаптивної архітектури системи.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Одним із важливих напрямків розвитку інтелектуальних автомобільних систем є системи безпеки

автомобіля. Основним призначенням систем безпеки є запобігання аварійній ситуації, при виникненні якої система самостійно (без участі водія) оцінює ймовірну небезпеку та за необхідності запобігає їй шляхом активного втручання у процес управління. Застосування систем безпеки дозволяє зберегти керованість та курсову стійкість автомобіля у критичних ситуаціях.

В умовах сьогодення широкого застосування знайшли інтелектуальні системи автомобільної безпеки наведені у табл. 1.

В основі роботи інтелектуальних систем автомобільної безпеки лежить принцип IoT. Децентралізовані характеристики сценаріїв IoT ефективно гармонують з архітектурою розподілених додатків. Дві відомі парадигми проектування архітектури програмного забезпечення, а саме архітектура мікросервісів і архітектура без серверів, набули широкого поширення в різних областях як невід'ємні компоненти архітектури розподілених програм. Архітектура мікросервісів полегшує створення дуже гнучких і масштабованих систем, перевершуючи складні централізовані методології обробки з точки зору масштабованості, зручності обслуговування та розширення. Отже, мікросервіс пропонує чудову адаптивність до змінних вимог, підвищуючи надійність і продуктивність системи. З іншого боку, безсерверна архітектура представляє більш гнучкий і універсальний підхід до розробки, який прискорює розгортання нових програм, одночасно зменшуючи витрати на розробку та експлуатацію.

Архітектура мікросервісів і безсерверна архітектура стикаються з певними проблемами, пов'язаними з цілісністю системи та інформаційною безпекою, включаючи ризики порушення конфіденційності інформації, викриття інтерфейсу та неадекватні заходи безпеки та конфіденційності в різних мікросервісах і функціях.

Завдяки широкому впровадженню технології зв'язку 5G IoT зазнав значного прогресу. Ефективний розподіл ресурсів в епоху 5G і 6G став вирішальним, враховуючи експоненціальне зростання даних у різних галузях, що вимагає інтелектуальних рішень для підвищення продуктивності мережі та надання високоякісних послуг користувачам. Різні сценарії додатків IoT вимагають різних підходів до архітектури системи, щоб відповідати вимогам до комунікаційних, обчислювальних ресурсів і ресурсів зберігання. У наступному еру 6G обчислювальна потужність поширюватиметься по всій мережі. Розвиток хмарних обчислень і периферійних обчислень полегшив міграцію звичайних програм до хмарних і периферійних середовищ, дозволяючи їм обслуговувати більшу базу користувачів. Переносючи значну кількість завдань хмарних обчислень на сервер, можна значно зменшити навантаження на мережеву хмару, тим самим прискорюючи швидкість обробки даних. Враховуючи наявні ресурси хмарних обчислень, туманних обчислень і периферійних обчислень, важливо гнучко використовувати ці ресурси та оптимізувати планування ресурсів, щоб задовольнити вимоги багаторівневого розгортання та гнучкого планування обчислювальних сховищ і мережевих ресурсів для майбутніх послуг 6G.

Таблиця 1 – Інтелектуальні системи автомобільної безпеки

№	Назва		Активний датчик / прилад	Фірма виробник
1	Система стеження за дорогою	Road tracking system	інфрачервоний лазерний промінь; сенсор LIDAR (Light Detection And Ranging)	Advanced Pedestrian Detection System компанії TRW і EyeSight фірми Subaru, BMW Night Vision, Honda Sensing, Ford Pre-Collision Assist, Toyota Night View, PRE-SAFE від Mercedes
2	Система нічного бачення для виявлення пішоходів у небезпечній близькості до проїжджої частини	Dynamic Light Spot	датчик серцебиття	BMW
3	Система стеження за розміткою на дорозі	LDW (Lane Departure Warning)	датчик відстані	BMW Night Vision, Honda Sensing, Ford Pre-Collision Assist
4	Система автоматичного перемикання ближнього та далекого світла фар	HBA (High Beam Assist)	камери стеження	BMW, Honda, Ford
5	Контроль втоми водія	DAS (Driver Attention Support)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– біометричні датчики;</li> <li>– інфрачервоний датчик за кермовим колесом, що контролює температуру обличчя.</li> <li>– п'єзоелектричний датчик у ремені безпеки для моніторингу частоти дихання;</li> <li>– провідні накладки на обід рульового колеса для вимірювання пульсу;</li> <li>– інфрачервоні датчики на обід рульового колеса для вимірювання температури долонь.</li> </ul>	Ford, Toyota
6	Система підтримки швидкості	SAS (Speed Assistance Systems)	датчик швидкості, датчик відстані	Ford, Toyota, Mercedes
7	Автоматичне аварійне кермо	AES (Automatic Emergency Steering)	датчик вимірювання рівня системи після-аварійного моніторингу, датчик швидкості, датчик осей, датчик повороту керма	BMW, Honda, Ford, Toyota, Mercedes

Традиційна монолітна архітектура програми, яка об'єднує всі програмні модулі в єдину програму, створює проблеми з точки зору розробки, обслуговування та розмежування завдань. Що потребує підвищених вимог до модульності та масштабованості програмного забезпечення. Щоб задовольнити ці вимоги, архітектура служби додатків еволюціонувала від початкової монолітної архітектури до сервісно-орієнтованої архітектури, а згодом до архітектури мікросервісів, яка краще узгоджується з вимогами Інтернету. Концепція архітектури мікросервісів була вперше представлена Мартіном Фаулером і Джеймсом Льюїсом у 2014 році. В останні роки зі швидким зростанням Інтернету монолітна архітектура додатків стала недостатньою для задоволення вимог, що призвело до широкого впровадження архітектури мікросервісів у різних галузях. У відповідності до концепцій розподіленої архітектури та відображення віртуальної мережі, архітектура мікросервісів інкапсулює відносно незалежні програми в різні служби, ізольовує бізнес-логіку та розгортає кожну службу окремо на різних серверах. Управління контейнерами використовується для контролю кожної

служби, забезпечуючи ефективне управління та розгортання компонентів системи.

Щоб звільнити розробників від обтяжливих завдань керування сервером, безсерверна технологія вводить концепцію хмарних сервісів у обчислювальну модель. Ця модель фактично відокремлює розробників додатків від серверів, звільняючи їх від обов'язків, пов'язаних із керуванням і безпекою серверів. Крім того, постачальники хмарних послуг розміщують базу інфраструктуру, усуваючи вплив відмінностей пристроїв на програми верхнього рівня. Порівняно з традиційними обчислювальними моделями, безсерверна технологія демонструє максимальну продуктивність з точки зору високого паралелізму, низької затримки та інших аспектів. Отже, функції планування та управління ресурсами, а також практики розподілених додатків є життєво важливими областями досліджень у сфері безсерверних технологій.

Загалом інтелектуальна система автомобільної безпеки націлена на три різні категорії користувачів: користувачі системи, постачальники послуг з оцінки відповідності, адміністратори системної платформи.

На основі аналізу початкової функціональної складової системи мікросервісів можна розділити за функціями виконання дій. В принципі, кожен обмежений контекст відповідає одному мікросервісу; однак такі фактори, як відповідальність за обслуговування та неоднорідність команди, повинні враховуватися під час процесу впровадження. У системі результати обмеженого контексту безпосередньо інформують підрозділ мікросервісів. Остаточна конфігурація мікросервісів складається з трьох основних доменів: домен користувача, домен реалізації та домен правила. На додаток до цих основних доменів існує домен статистики, який полегшує пошук інформації адміністратора, а також загальний домен, який підтримує системні операції.

На основі дизайну мікросервісів і розділення формується комплексна архітектура платформи. Для підвищення якості впровадження та функціональності інтелектуальної системи автомобільної безпеки пропонується системна платформа, яка поєднує мікросервісну та безсерверну архітектури, розглядаючи різні аспекти, включаючи загальну діаграму архітектури, діаграму системних аспектів, подання процесу, режим зв'язку мікросервісу та механізм взаємодії мікросервісу. Проект архітектури системи забезпечує детальне уявлення про загальну технічну архітектуру системи, структуру багаторівневої логіки надання послуг та потік даних у системі. Дизайн безперервної інтеграції/безперервного розгортання окреслює методи розгортання як інтерфейсного, так і бекенд-компонентів, а також покрокових процедур. Крім того, режим зв'язку мікросервісу пояснює обґрунтування вибору технології реалізації та пропонує рішення шляху API.

У процесі проектування архітектури оцінка трафікового навантаження на систему виявляється складною через впровадження нового бізнес-сценарію. Розгортання додатків безпосередньо на хмарних серверах із використанням традиційних підходів вимагатиме горизонтального масштабування вручну для забезпечення недостатнього трафіку, що потенційно призведе до втрати ресурсів, якщо кілька серверів надано заздалегідь. Для вирішення цієї проблеми та відповідності бізнес-вимогам прийнято безсерверну архітектуру на основі AWS. Завдяки розгортанню мікросервісів на AWS Lambda та використанню периферійних обчислень програма може автоматично еластично масштабуватися залежно від обсягу трафіку, а витрати розраховуються відповідно до кількості запитів і часу обчислення.

Щоб оперативно реагувати на зміну вимог користувачів, підвищувати ефективність розробки та пришвидшувати доставку системи, впровадження безперервної інтеграції та безперервної доставки (CI/CD) має важливе значення для автоматизації всього процесу. Автоматизація таких завдань, як компіляція, збірка та розгортання коду, зводить до мінімуму потребу в ручному моніторингу кожної зміни та знижує системні ризики шляхом проактивного виявлення потенційних проблем. Цей процес автоматизації охоплює не тільки дії, пов'язані з кодом, але й динамічне створення, знищення та оновлення ресурсів,

необхідних для роботи системи, включаючи сервери та бази даних. Загальний дизайн безсерверної архітектури системи показаний на рис. 1.

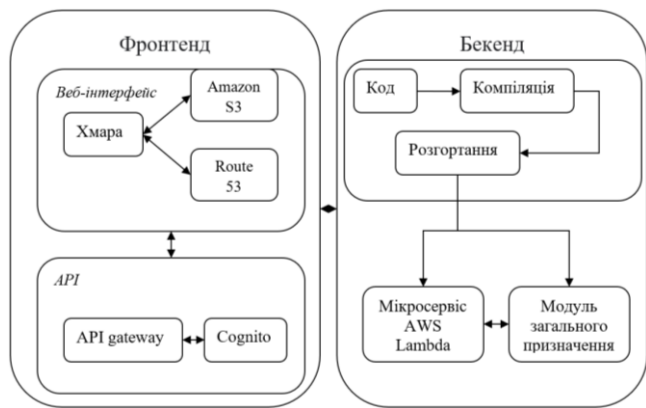


Рис. 1. Архітектура системи

Технічна архітектура системи в першу чергу складається з наступних компонентів:

- мікросервісний серверний модуль, що складається з Lambda. Сервер використовує AWS Lambda як обчислювальний блок для реалізації безсерверної системної архітектури, використовуючи її можливості автоматичного масштабування та економічну ефективність на основі принципів оплати за використання;
- інтерфейсний модуль, створений за допомогою React і розміщений у хмарних службах. Інтерфейсні функціональні модулі розробляються за допомогою React, а скомпільовані файли розгортаються на S3 і поширюються через CloudFront CDN, щоб покращити доступність глобальних користувачів і підвищити продуктивність;
- безсерверні загальні компонентні послуги, що надаються постачальниками хмарних послуг. Загальні безсерверні компоненти охоплюють бази даних DynamoDB NoSQL, черги повідомлень, служби електронної пошти та служби зберігання об'єктів. Хоча база даних спеціально призначена для мікросервісу, решта компонентів розроблено як загальні компоненти, доступні для обчислювального модуля мікросервісу (Lambda);
- конвеєри безперервної інтеграції та безперервного розгортання (CI/CD). Конвеєр CI/CD розділено на два автономні конвеєри для інтерфейсного та внутрішнього модулів. Кожен конвеєр включає в себе сховище коду, службу збірки та блок розгортання. Після виявлення змін у основній гілці сховища коду конвеєр ініціює виконання та, після затвердження, розганяє зміни у призначеному середовищі облікового запису. Впровадження CI/CD сприяє прискореній розробці та зменшенню часу доставки.

Враховуючи масштабність сучасних інтелектуальних систем автомобільної безпеки запропонована архітектура може бути інтегрована під різні системи такі як виявлення несправності в роботі автомобіля, аварійне керування авто, система підтримки швидкості, тощо.

Відбувається це за рахунок встановлення датчиків та їх зв'язку з мікропроцесором з підтримкою WiFi, який є доступним у сучасних мікроконтроллерах,

який, таким чином, може встановлювати бездротове з'єднання між різними мережами та Інтернетом і навіть передавати та приймати дані. Параметри руху та стану авто і дороги, зчитуються датчиками і використовуються пристроєм, а отримані дані зберігаються в хмарну базу даних.

### Висновки

У роботі проаналізовано інтелектуальні системи автомобільної безпеки на основі хмарних архітектур. Доведено, що сучасна інтелектуальна система авто-

мобільної безпеки потребує розподіленої, гнучко конфігурованої та динамічно масштабованої архітектури мережевої програми. Ця архітектура має важливе значення, щоб задовольнити постійно зростаючі вимоги до розширюваної системи додатків IoT, підвищуючи при цьому гнучкість планування та масштабованість.

Перспективами подальших досліджень є розробка та впровадження інтелектуальної системи керування рухом автомобіля в складних умовах управління на базі запропонованої архітектури.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коростельов М. В., Гнатов А. В. Дослідження активних систем безпеки для автотранспортних засобів / Автомобільний транспорт, 2020. вип. 46. С. 40-46. DOI: 10.30977/AT.2219-8342.2020.46.0.40
2. Інтелектуальна транспортна система міста. Адаптивне керування рухом / Алексієв О.П., Алексієв В.О., Неронов С.М., Дьяков А.Е. // Матеріали конференції КІТ-2022, Харків, ХНАДУ, 2022. С. 134-136.
3. Бортові системи інтелектуального автомобіля / Мигаль В.Д., Бажинова Т.О., Іванов А.А. // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація» – 2019. Харків, 2019. С. 95-96.
4. Lin Dianchao, Li Li. (2023). An Efficient Safety-Oriented Car-Following Model for Connected Automated Vehicles Considering Discrete Signals. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. PP. 1-13. 10.1109/TVT.2023.3257048.
5. Wang Yu, Wu Jie, He Hanfu. (2023). Research on Sound-Guided Design of Lane Departure Scenarios in Intelligent Car Cockpit. 10.1007/978-3-031-35678-0\_13.
6. Song Dongjian, Zhu Bing, Zhao Jian, Han Jiayi, Chen Zhicheng. (2023). Personalized Car-Following Control Based on a Hybrid of Reinforcement Learning and Supervised Learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. PP. 1-16. 10.1109/TITS.2023.3245362.
7. Liu Yang, Fan Yingqi, Huang Darong, Mi Bo, Huang Liyuan. (2022). Formal Model and Analysis for the Random Event in the Intelligent Car with Stochastic Petri Nets and Z. *Security and Communication Networks*. 2022. 10.1155/2022/3288308.
8. Elsamadisy Omar, Shi Tianyu, Smirnov Iliia, Abdulhai Baher. (2023). Safe, Efficient, and Comfortable Reinforcement-Learning-Based Car-Following for AVs with an Analytic Safety Guarantee and Dynamic Target Speed. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 10.1177/03611981231171899.
9. Chen Xingyu, Bai Haijian, Ding Heng, Gao Jianshe, Huang Wenjuan. (2023). A Safety Control Method of Car-Following Trajectory Planning Based on LSTM. *Promet - Traffic&Transportation*. 35. 380-394. 10.7307/ptt.v35i3.118.
10. Li Maosheng, Fan Jing, Lee Jaeyoung. (2023). Modeling Car-Following Behavior with Different Acceptable Safety Levels. *Sustainability*. 15. 6282. 10.3390/su15076282.
11. Wang Shufeng, Wang Xinkai, Wang Shihao. (2022). Lane Change Decision and Trajectory Planning for Intelligent Cars in Curved Road Scenarios. 10.3233/ATDE221112.
12. Peng Liqun, Huang Ju, Zhou Tuqiang, Xu Shucui. (2023). V2V-enabled cooperative adaptive cruise control strategy for improving driving safety and travel efficiency of semi-automated vehicle fleet. *IET Intelligent Transport Systems*. n/a-n/a. 10.1049/itr2.12402.
13. Kapadia Riya, Mehta Kush. (2023). Advancing Autonomous Navigation: Deep Learning Techniques for Self-Driving Cars. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 11. 1863-1869. 10.22214/ijra-set.2023.55491.

Received (Надійшла) 24.08.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 08.11.2023

### Intelligent automotive security systems based on cloud architectures

Denys Polozhyi, Oleksandr Oriekhov

**Abstract.** Intelligent automotive security systems based on cloud architectures are investigated in the work. The relationship between modern car safety systems and Internet of Things technology is shown. Modern intelligent automobile safety systems are characterized. The principles of formation of the main functional component systems are disclosed. Serverless computing has proven to be a significant shift in the way developers build and deploy applications. It is emphasized that by abstracting the underlying infrastructure, serverless computing allows developers to focus on writing code and creating functionality. Despite some limitations, the advantages of serverless computing, including scalability, cost-effectiveness, and flexibility, make it an attractive option for many automotive safety use cases. The categories of system users are characterized, these are system users, conformity assessment service providers, and system platform administrators. The principles of formation of microservices are described, it is noted that in the car safety system, the results of the limited context directly inform the microservices unit. The final configuration of microservices consists of three main domains: the user domain, the implementation domain, and the rule domain. The complex architecture of the platform is formed, which is presented graphically with the separation of the two main components of the frontend and backend, the structure of the multi-level logic of service provision and the flow of data in the system are described. It is noted that, taking into account the scale of modern intelligent car safety systems, the proposed architecture can be integrated into various systems, such as detection of malfunctions in the operation of the car, emergency control of the car, speed support system, etc. The process of system integration and the principle of operation using sensors of various directions are described in detail.

**Keywords:** cloud, microservice, serverless architecture, distributed application, security, road, car, intelligent system.

В. М. Рудницький<sup>1,3</sup>, В. В. Ларін<sup>1</sup>, О. Г. Мельник<sup>2</sup>, Д. А. Підласий<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Державний НДІ випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Черкаси, Україна

<sup>2</sup> Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля, Черкаси, Україна

<sup>3</sup> Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

## ДИСКРЕТНО-КАЗУАЛЬНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ФУНКЦІЙ І СЕТ-ОПЕРАЦІЙ

**Анотація.** У статті запропоновано один з перспективних напрямків розвитку малоресурсної криптографії, а саме СЕТ-шифрування. Основною перевагою СЕТ-шифрування вважається можливість створення технології побудови шифрів з заданими характеристиками. Проведений огляд літературних джерел по тематиці статті. Обґрунтовано необхідність створення в СЕТ-операціях елементарних функцій, які забезпечують лінійне і нелінійне перетворення вхідних Сі-квантів в вихідні, що приводить до складності моделей операцій. Застосування дискретно-алгебраїчного опису моделей забезпечує можливість однакового представлення, як лінійних так і нелінійних СЕТ-операцій. Запропонований дискретно-казуальний опис забезпечує спрощення моделей СЕТ-операцій без втрати інформативності, а також забезпечує можливість моделювання багатооперандних СЕТ-операцій, які поєднують в собі як лінійні так і нелінійні однооперандні СЕТ-операції. Дискретно алгебраїчний опис моделей виявився громіздким і не придатним для моделювання і дослідження багатооперандних СЕТ-операцій.

**Ключові слова:** малоресурсна криптографія, СЕТ-шифрування, операції керовані інформацією, елементарні функції, дискретно-казуальні моделі, потокове шифрування.

### Вступ

**Постановка проблеми.** На теперішній час в теорії СЕТ-шифрування класифіковано лише 3Сі-квантові СЕТ-операції. Слід додатково відмітити, що класифіковані групи операцій, описуються за допомогою різного математичного представлення. Лише застосування дискретно-алгебраїчного представлення забезпечує уніфікований опис СЕТ-операцій, але приводить до збільшення складності моделей, складності реалізації, і ускладнює їх сприйняття.

Класифікуються СЕТ-операції по кількості операндів та по кількості Сі-квантів інформації, яка кодується. В даному дослідженні обмежимося 2 і 3Сі-квантовими СЕТ-операціями, операціями, які кодуєть 2 або 3 Сі-кванти інформації.

Традиційно в криптографії використовується достатньо обмежений набір операцій криптографічного перетворення. Це операції додавання за модулями, підстановки, перестановки та зсуви. Також перестановки, зсуви та операції які керуються інформацією. Основною вимогою до можливості застосування будь якої операції в крипто алгоритмі є наявність операції оберненого перетворення. Застосування СЕТ-операцій дозволяє значно збільшити кількість криптографічних перетворень на основі яких будуються крипто алгоритми. Крім того, в процесі побудови та дослідження СЕТ-операцій виявляються нові принципи і підходи для побудови криптоалгоритмів.

Для сприйняття перелічених гіпотез та розуміння сутності СЕТ-операцій розглянемо приклад з якого почалося їх дослідження.

Всім відомо що традиційне потокове шифрування полягає в послідовному побітовому додаванню по модулю два інформації і псевдовипадкової (гамуючої) послідовності. В результаті виконання додавання по модулю два, біт інформації, в залеж-

ності від значення біта псевдовипадкової послідовності залишиться незмінним, або буде інвертований. Іншими словами, над бітом інформації можуть бути виконані дві операції: операція повтору, якщо біт псевдовипадкової послідовності рівний «0», або операція інверсії, якщо біт псевдовипадкової послідовності рівний «1».

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Основою СЕТ-шифрування є СЕТ-операції, які будуються з елементарних функцій криптографічного перетворення [1]. Тому класифікація СЕТ-операцій взаємопов'язана з класифікацією елементарних функцій [2]. Дослідження елементарних функцій і побудованих на їх основі 3Сі-квантових СЕТ-операцій проводилось на основі класифікованих груп [2]. При цьому для кожної класифікованої групи визначався математичний апарат, який дозволяє описувати СЕТ-операції [3] – [4], а також моделювати групи класифікованих операцій [5] – [7]. На сьогоднішній день задача опису і моделювання СЕТ-операцій, побудованих на основі елементарних функцій з різних класифікованих груп не розглядалася.

**Метою роботи** є розробка спеціалізованої комп'ютерної системи, яка дозволить моделювати замкнені тонкостінні циліндричні оболонки та здійснювати розрахунок механічних характеристик задач пружно-деформованого стану оболонкових конструкцій із підвищеною точністю.

### Основний матеріал

Відповідно до класифікації [2] група елементарних функцій перестановок має самі прості моделі:

$$\begin{aligned} f_{15} &= x_1; f_{51} = x_2; f_{85} = x_3; \\ f_{240} &= \bar{x}_1; f_{204} = \bar{x}_2; f_{170} = \bar{x}_3. \end{aligned} \quad (1)$$

Нижні індекси в позначенні елементарних функцій відображають десяткову позначення двійкового коду, який відповідає результату перетворення, відповідно до таблиці істинності функції. Нижні інде-



кси в позначенні аргументу, відповідають порядковому номеру Сі-кванта вхідної інформації.

На основі елементарних функцій (1) будуються СЕТ-операції перестановок Сі-квантів [5]:

$$C_{51,170,15}(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ \bar{x}_3 \\ x_1 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$C'_{51,170,15}(x) = C_{85,15,204}(x) = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix}.$$

Наведений приклад СЕТ-операцій (2), для прямого і оберненого перетворення інформації показує простору представлення моделей даної групи.

Розглянемо елементарні функції побудовані на основі додавання за модулем два [5]:

$$f_{60} = x_1 \oplus x_2; f_{90} = x_1 \oplus x_3; f_{102} = x_2 \oplus x_3;$$

$$f_{105} = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3; f_{195} = x_1 \oplus x_2 \oplus 1. \quad (3)$$

На основі даних елементарних функцій (3) будуються матричні СЕТ-операції. Наприклад:

$$C_{102,105,90}(x) = \begin{bmatrix} x_2 \oplus x_3 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \\ x_1 \oplus x_3 \end{bmatrix};$$

$$C'_{102,105,90}(x) = C_{90,102,105}(x) = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_2 \oplus x_3 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

При використанні інверсних елементарних функцій, також використовується матричне представлення (лінійне), з додатковим гамуванням. Наприклад:

$$C_{102,105,165}(x) = \begin{bmatrix} x_2 \oplus x_3 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \\ x_1 \oplus x_3 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$C'_{102,105,165}(x) = C_{90,153,150}(x) = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_2 \oplus x_3 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

При синтезі СЕТ-операцій одночасно можуть використовуватися елементарні функції перестановок та елементарні функції побудовані на основі додавання за модулем два. Наприклад:

$$C_{102,60,51}(x) = \begin{bmatrix} x_2 \oplus x_3 \\ x_1 \oplus x_2 \\ x_2 \end{bmatrix};$$

$$C'_{102,105,165}(x) = C_{102,85,90}(x) = \begin{bmatrix} x_2 \oplus x_3 \\ x_3 \\ x_1 \oplus x_3 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Побудова та використання моделей даних СЕТ-операцій не викликає складності, тому що вони представляються матричними (лінійними) моделями, або матричними моделями з додатковим гаму-

ванням. Група елементарних функцій перестановок керованих інформацією забезпечує вибір Сі-кванта результату з двох вхідних Сі-квантів. Вибір залежить від значення Сі-кванта управління [7]. Результуючий Сі-квант, може бути як прямим так і інвертованим. Наприклад:

$$f_{46} = x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3; f_{53} = x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_2 \cdot x_3;$$

$$f_{58} = \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3; f_{71} = \bar{x}_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot x_2. \quad (6)$$

На основі даних елементарних функцій будуються СЕТ-операції перестановок керованих інформацією. Дані СЕТ-операції описуються дискретними, або дискретно-алгебраїчними моделями [4]. Наприклад:

$$C_{39,58,116}(x) = \begin{bmatrix} x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot x_3 \\ \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \\ \bar{x}_2 \cdot x_3 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2 \end{bmatrix};$$

$$C'_{39,58,116}(x) = C_{46,27,92}(x) = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_2 \cdot x_3 \\ \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \end{bmatrix};$$

$$C_{39,58,116}(x) = \begin{cases} \begin{bmatrix} x_2 & \text{якщо } x_3 = 0 \\ x_1 & \text{якщо } x_3 = 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_2 & \text{якщо } x_1 = 0 \\ \bar{x}_3 & \text{якщо } x_1 = 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_3 & \text{якщо } x_2 = 0 \\ \bar{x}_1 & \text{якщо } x_2 = 1 \end{bmatrix} \end{cases};$$

$$C'_{39,58,116}(x) = C_{46,27,92}(x) = \begin{cases} \begin{bmatrix} x_1 & \text{якщо } x_2 = 0 \\ \bar{x}_3 & \text{якщо } x_2 = 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_1 & \text{якщо } x_3 = 0 \\ x_2 & \text{якщо } x_3 = 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_3 & \text{якщо } x_1 = 0 \\ \bar{x}_2 & \text{якщо } x_1 = 1 \end{bmatrix} \end{cases}. \quad (7)$$

При синтезі СЕТ-операцій елементарних функцій перестановок керованих інформацією можуть поєднуватися з елементарними функції перестановок, або елементарними функціями побудованими на основі додавання за модулем два.

Наприклад:

$$C_{39,85,27}(x) = \begin{bmatrix} x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot x_3 \\ x_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_2 \cdot x_3 \end{bmatrix};$$

$$C'_{39,85,27}(x) = C_{71,29,51}(x) = \begin{bmatrix} \bar{x}_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot x_2 \\ x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_2 \cdot x_3 \\ x_2 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$C_{53,58,102}(x) = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3 \\ \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \\ x_2 \oplus x_3 \end{bmatrix};$$

$$C'_{53,58,102}(x) = C_{60,27,78}(x) = \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_2 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Розглянуті СЕТ-операції (7) – (9), включають в себе нелінійні елементарні функції перестановок керованих інформацією. Тому їх синтез і аналіз вимагають сумісного дослідження лінійних і нелінійних криптографічних перетворень [6]. На сьогоднішній день відсутні публікації про результати досліджень СЕТ-операцій, отримані на основі поєднання елементарних функцій перестановок керованих інформацією з елементарними функціями перестановок (приклад (8)), або з елементарними функціями побудованими на основі додавання за модулем два (приклад (9)).

Розглянемо групу елементарних функцій операцій керованих інформацією [2]. По аналогії з елементарними функціями перестановок керованих інформацією їх доцільно представляти дискретними, або дискретно-алгебраїчними моделями.

Наприклад:

$$\begin{aligned} f_{77} &= x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 = \\ &= \begin{cases} \bar{x}_2 \cdot x_3 & \text{якщо } x_1 = 0; \\ \bar{x}_2 \vee x_3 & \text{якщо } x_1 = 1; \end{cases} \\ f_{212} &= \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 = \\ &= \begin{cases} \bar{x}_2 \vee x_3 & \text{якщо } x_1 = 0; \\ \bar{x}_2 \cdot x_3 & \text{якщо } x_1 = 1. \end{cases} \end{aligned}$$

При побудові СЕТ-операцій дані елементарні функції можуть поєднуватися з елементарними функціями перестановок керованих інформацією. Наприклад:

$$\begin{aligned} C_{23,43,113}(x) &= \begin{bmatrix} x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \\ \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3 \end{bmatrix}; \\ C'_{23,43,113}(x) &= C_{43,23,77}(x) = \\ &= \begin{bmatrix} x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \\ x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \end{bmatrix}; \\ C_{23,58,113}(x) &= \begin{bmatrix} x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3 \\ \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \\ \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3 \end{bmatrix}; \\ C'_{23,43,113}(x) &= C_{46,23,77}(x) = \\ &= \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \\ x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

Представимо СЕТ-операції (10) і (11) дискретно-алгебраїчними.

$$C_{23,43,113}(x) = \begin{bmatrix} \begin{cases} x_2 \cdot x_3 & \text{якщо } x_1 = 0 \\ x_2 \vee x_3 & \text{якщо } x_1 = 1 \end{cases} \\ \begin{cases} x_1 \cdot \bar{x}_3 & \text{якщо } x_2 = 0 \\ x_1 \vee \bar{x}_3 & \text{якщо } x_2 = 1 \end{cases} \\ \begin{cases} \bar{x}_1 \cdot x_2 & \text{якщо } x_3 = 0 \\ \bar{x}_1 \vee x_2 & \text{якщо } x_3 = 1 \end{cases} \end{bmatrix};$$

$$\begin{aligned} C'_{23,43,113}(x) &= C_{43,23,77}(x) = \\ &= \begin{bmatrix} \begin{cases} x_2 \cdot \bar{x}_3 & \text{якщо } x_1 = 0 \\ x_2 \vee \bar{x}_3 & \text{якщо } x_1 = 1 \end{cases} \\ \begin{cases} x_1 \cdot x_3 & \text{якщо } x_2 = 0 \\ x_1 \vee x_3 & \text{якщо } x_2 = 1 \end{cases} \\ \begin{cases} x_1 \cdot \bar{x}_2 & \text{якщо } x_3 = 0 \\ x_1 \vee \bar{x}_2 & \text{якщо } x_3 = 1 \end{cases} \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} C_{23,58,113}(x) &= \begin{bmatrix} \begin{cases} x_1 \cdot x_3 & \text{якщо } x_2 = 0 \\ x_1 \vee x_3 & \text{якщо } x_2 = 1 \end{cases} \\ \begin{cases} x_2 & \text{якщо } x_1 = 0 \\ \bar{x}_3 & \text{якщо } x_1 = 1 \end{cases} \\ \begin{cases} \bar{x}_1 \cdot x_2 & \text{якщо } x_3 = 0 \\ \bar{x}_1 \vee x_2 & \text{якщо } x_3 = 1 \end{cases} \end{bmatrix}; \\ C'_{23,58,113}(x) &= C_{46,23,77}(x) = \\ &= \begin{bmatrix} \begin{cases} x_1 & \text{якщо } x_2 = 0 \\ \bar{x}_3 & \text{якщо } x_2 = 1 \end{cases} \\ \begin{cases} x_1 \cdot x_3 & \text{якщо } x_2 = 0 \\ x_1 \vee x_3 & \text{якщо } x_2 = 1 \end{cases} \\ \begin{cases} x_1 \cdot \bar{x}_2 & \text{якщо } x_3 = 0 \\ x_1 \vee \bar{x}_2 & \text{якщо } x_3 = 1 \end{cases} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (13)$$

При синтезі СЕТ-операцій елементарні функції операції керованих інформацією можуть поєднуватися з елементарними функціями розширеного матричного криптографічного перетворення. До групи елементарних функцій розширеного матричного криптографічного перетворення належать елементарні функції отримані шляхом додавання по модулю два до елементарної функції перестановки нелінійного доданку. Наприклад:

$$\begin{aligned} f_{30} &= x_1 \oplus (x_2 \cdot x_2); \\ f_{57} &= x_2 \oplus (x_1 \cdot \bar{x}_3); \\ f_{106} &= x_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2). \end{aligned}$$

$$C_{30,57,106}(x) = \begin{bmatrix} x_1 \oplus (x_2 \cdot x_3) \\ x_2 \oplus (x_1 \cdot \bar{x}_3) \\ x_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2) \end{bmatrix};$$

$$\begin{aligned} C'_{30,57,106}(x) &= C_{45,54,106}(x) = \\ &= \begin{bmatrix} x_1 \oplus (x_2 \cdot \bar{x}_3) \\ x_2 \oplus (x_1 \cdot x_3) \\ x_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2) \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (14)$$

$$C_{30,77,120}(x) = \begin{bmatrix} x_1 \oplus (x_2 \cdot x_2) \\ x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \\ x_1 \oplus (\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3) \end{bmatrix};$$

$$C_{30,77,120}^{\prime}(x) = C_{43,108,54}(x) = \begin{bmatrix} x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3 \\ x_2 \oplus (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3) \\ x_2 \oplus (x_1 \cdot x_3) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Дискретно-алгебраїчні моделі СЕТ-операцій (14) і (15) можна представити.

$$C_{30,57,106}(x) = \begin{bmatrix} \begin{cases} x_2 \cdot x_3 & \text{якщо } x_1 = 0 \\ \overline{x_2 \cdot x_3} & \text{якщо } x_1 = 1 \end{cases} \\ \begin{cases} x_1 \cdot \bar{x}_3 & \text{якщо } x_2 = 0 \\ \overline{x_1 \cdot \bar{x}_3} & \text{якщо } x_2 = 1 \end{cases} \\ \begin{cases} \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 & \text{якщо } x_3 = 0 \\ \overline{\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2} & \text{якщо } x_3 = 1 \end{cases} \end{bmatrix};$$

$$C_{30,57,106}^{\prime}(x) = C_{45,54,1067}(x) = \begin{bmatrix} \begin{cases} x_2 \cdot \bar{x}_3 & \text{если } x_1 = 0 \\ \overline{x_2 \cdot \bar{x}_3} & \text{если } x_1 = 1 \end{cases} \\ \begin{cases} x_1 \cdot x_3 & \text{если } x_2 = 0 \\ \overline{x_1 \cdot x_3} & \text{если } x_2 = 1 \end{cases} \\ \begin{cases} \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 & \text{якщо } x_3 = 0 \\ \overline{\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2} & \text{якщо } x_3 = 1 \end{cases} \end{bmatrix}; \quad (16)$$

$$C_{30,77,120}(x) = \begin{bmatrix} \begin{cases} x_2 \cdot x_3 & \text{якщо } x_1 = 0 \\ \overline{x_2 \cdot x_3} & \text{якщо } x_1 = 1 \end{cases} \\ \begin{cases} \bar{x}_2 \cdot x_3 & \text{якщо } x_1 = 0 \\ \bar{x}_2 \vee x_3 & \text{якщо } x_1 = 1 \end{cases} \\ \begin{cases} \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 & \text{якщо } x_1 = 0 \\ \overline{\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3} & \text{якщо } x_1 = 1 \end{cases} \end{bmatrix};$$

$$C_{30,77,120}^{\prime}(x) = C_{43,108,54}(x) = \begin{bmatrix} \begin{cases} x_1 \cdot \bar{x}_3 & \text{якщо } x_2 = 0 \\ x_1 \vee \bar{x}_3 & \text{якщо } x_2 = 1 \end{cases} \\ \begin{cases} \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 & \text{якщо } x_2 = 0 \\ \overline{\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3} & \text{якщо } x_2 = 1 \end{cases} \\ \begin{cases} x_1 \cdot x_3 & \text{якщо } x_2 = 0 \\ \overline{x_1 \cdot x_3} & \text{якщо } x_2 = 1 \end{cases} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Моделі нелінійних СЕТ-операцій (10) - (17) не забезпечують простоту взаємозв'язків між операціями прямого і оберненого криптографічного перетворення, що суттєво ускладнює їх застосування в криптографічних системах.

Слід відмітити, що математичний опис даних моделей суттєво відрізняється від математичного опису моделей (2), (4) і (5).

Дискретно-алгебраїчне представлення моделей

СЕТ-операцій дозволяє описати як лінійні так і нелінійні криптографічні перетворення. Наприклад, елементарні функції перестановок (1) можна представити:

$$f_{15} = x_1 = \begin{cases} x_1 & \text{якщо } x_2 = 0; \\ x_1 & \text{якщо } x_2 = 1; \end{cases} = \begin{cases} x_1 & \text{якщо } x_3 = 0; \\ x_1 & \text{якщо } x_3 = 1; \end{cases}$$

$$f_{51} = x_2 = \begin{cases} x_2 & \text{якщо } x_1 = 0; \\ x_2 & \text{якщо } x_1 = 1; \end{cases} = \begin{cases} x_2 & \text{якщо } x_3 = 0; \\ x_2 & \text{якщо } x_3 = 1; \end{cases}$$

$$f_{85} = x_3 = \begin{cases} x_3 & \text{якщо } x_1 = 0; \\ x_3 & \text{якщо } x_1 = 1; \end{cases} = \begin{cases} x_3 & \text{якщо } x_2 = 0; \\ x_3 & \text{якщо } x_2 = 1; \end{cases}$$

$$f_{240} = \bar{x}_1 = \begin{cases} \bar{x}_1 & \text{якщо } x_2 = 0; \\ \bar{x}_1 & \text{якщо } x_2 = 1; \end{cases} = \begin{cases} \bar{x}_1 & \text{якщо } x_3 = 0; \\ \bar{x}_1 & \text{якщо } x_3 = 1. \end{cases}$$

Елементарні функції побудовані на основі додавання за модулем два (3) можна описати наступним чином:

$$f_{60} = x_1 \oplus x_2 = \begin{cases} x_2 & \text{якщо } x_1 = 0; \\ \bar{x}_2 & \text{якщо } x_1 = 1; \end{cases} = \begin{cases} x_1 & \text{якщо } x_2 = 0; \\ \bar{x}_1 & \text{якщо } x_2 = 1; \end{cases}$$

$$f_{90} = x_1 \oplus x_3 = \begin{cases} x_3 & \text{якщо } x_1 = 0; \\ \bar{x}_3 & \text{якщо } x_1 = 1; \end{cases} = \begin{cases} x_1 & \text{якщо } x_3 = 0; \\ \bar{x}_1 & \text{якщо } x_3 = 1; \end{cases}$$

$$f_{102} = x_2 \oplus x_3 = \begin{cases} x_3 & \text{якщо } x_2 = 0 \\ \bar{x}_3 & \text{якщо } x_2 = 1 \end{cases} = \begin{cases} x_2 & \text{якщо } x_3 = 0 \\ \bar{x}_2 & \text{якщо } x_3 = 1 \end{cases}$$

$$f_{105} = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 = \begin{cases} x_2 \oplus x_3 & \text{якщо } x_1 = 0; \\ \overline{x_2 \oplus x_3} & \text{якщо } x_1 = 1; \end{cases} =$$

$$\begin{cases} x_1 \oplus x_3 & \text{якщо } x_2 = 0; \\ \overline{x_1 \oplus x_3} & \text{якщо } x_2 = 1; \end{cases} =$$

$$\begin{cases} x_1 \oplus x_2 & \text{якщо } x_3 = 0; \\ \overline{x_1 \oplus x_2} & \text{якщо } x_3 = 1; \end{cases}$$

$$f_{195} = x_1 \oplus x_2 \oplus 1 = \begin{cases} \bar{x}_2 & \text{якщо } x_1 = 0; \\ x_2 & \text{якщо } x_1 = 1; \end{cases} = \\ = \begin{cases} \bar{x}_1 & \text{якщо } x_2 = 0; \\ x_1 & \text{якщо } x_2 = 1. \end{cases}$$

Наведені моделі елементарних функцій свідчать про те що будь яку SET-операцію дискретно-алгебраїчною моделлю. Проте дискретно-алгебраїчні моделі SET-операцій достатньо громіздкі (складні) і ускладнюють пошук взаємозв'язків між прямими і оберненими операціями, а також взаємозв'язків в групах SET-операцій.

Вирішити протиріччя між розширенням можливості однотипного опису SET-операцій і зменшення складності самих моделей полягає в представлення SET-операцій як адаптованого дискретного аналога опису системи ситуаційного управління.

В ситуаційному управлінні стан системи описується за допомогою трьох подій

$$(A; B; C),$$

де  $A$  – подія яка передувала події  $B$ ,  $B$  – подія яка реалізується в даний час,  $C$  – подія яка буде реалізована лише після успішного завершення події  $B$  [8]. Опишемо стан дискретної системи управління наступним чином: в залежності від результату завершення події  $B$  буде реалізована подія  $A$ , або подія  $C$ . Нехай події  $A$ ,  $B$  і  $C$  представляють собою реалізацію дискретних функцій  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$  і  $f_3(x)$ . Для спрощення сприйняття дискретної функції як набору її трьох складових, доцільно кожен складову взяти в дужки. В результаті отримаємо модель:

$$f(x) = (f_1(x))(f_2(x))(f_3(x)) \quad (18)$$

Модель (18) трактується наступним чином: в залежності від результату виконання функції  $f_2(x)$  буде реалізована функція  $f_1(x)$ , або  $f_3(x)$ . Для однозначного трактування моделі (18) будемо вважати, що за умови  $f_2(x) = 0$  буде виконуватися функція  $f_1(x)$ , інакше буде виконуватися функція  $f_3(x)$ .

Модель (18) будемо називати дискретно-казуальною моделлю.

Слід відмітити що в дискретно-казуальній моделі (18) функції  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$  і  $f_3(x)$  можуть бути представлені дискретно-казуальними моделями.

Дискретно-казуальний опис дає можливість спростити дискретно-алгебраїчні моделі елементарних функцій і SET-операцій.

Дискретно казуальний метод дозволяю описувати розглянуті раніше моделі SET-операцій.

SET-операції з використанням елементарних функцій перестановок керованих інформацією. Наприклад моделі (7) – (8).

$$C_{39,58,116}(x) = \begin{bmatrix} (x_2)(x_3)(x_1) \\ (x_2)(x_1)(\bar{x}_3) \\ (x_3)(x_2)(\bar{x}_1) \end{bmatrix};$$

$$C_{39,58,116}'(x) = C_{46,27,92}(x) = \begin{bmatrix} (x_1)(x_2)(\bar{x}_3) \\ (x_1)(x_3)(x_2) \\ (x_3)(x_1)(\bar{x}_2) \end{bmatrix};$$

$$C_{39,85,27}(x) = \begin{bmatrix} (x_2)(x_3)(x_1) \\ (x_3)(x_1)(x_3) \\ (x_1)(x_3)(x_2) \end{bmatrix};$$

$$C_{39,85,27}'(x) = C_{71,29,51}(x) = \begin{bmatrix} (x_3)(x_2)(\bar{x}_1) \\ (x_1)(x_2)(x_3) \\ (x_2)(x_1)(x_2) \end{bmatrix}.$$

SET-операції з використанням елементарних функцій операцій керованих інформацією. Наприклад моделі (12) і (13):

$$C_{23,43,113}(x) = \begin{bmatrix} (x_2 \cdot x_3)(x_1)(x_2 \vee x_3) \\ (x_1 \cdot \bar{x}_3)(x_2)(x_1 \vee \bar{x}_3) \\ (\bar{x}_1 \cdot x_2)(x_3)(\bar{x}_1 \vee x_2) \end{bmatrix};$$

$$C_{23,43,113}'(x) = C_{43,23,77}(x) = \\ = \begin{bmatrix} (x_2 \cdot \bar{x}_3)(x_1)(x_2 \vee \bar{x}_3) \\ (x_1 \cdot x_3)(x_2)(x_1 \vee x_3) \\ (x_1 \cdot \bar{x}_2)(x_3)(x_1 \vee \bar{x}_2) \end{bmatrix};$$

$$C_{23,58,113}(x) = \begin{bmatrix} (x_2 \cdot x_3)(x_1)(x_2 \vee x_3) \\ (x_1)(x_2)(\bar{x}_1) \\ (\bar{x}_1 \cdot x_2)(x_3)(\bar{x}_1 \vee x_2) \end{bmatrix};$$

$$C_{23,58,113}'(x) = C_{46,23,77}(x) = \\ = \begin{bmatrix} (x_2)(x_1)(\bar{x}_3) \\ (x_1 \cdot x_3)(x_2)(x_1 \vee x_3) \\ (x_1 \cdot \bar{x}_2)(x_3)(x_1 \vee \bar{x}_2) \end{bmatrix}.$$

SET-операції з використанням елементарних функцій розширеного матричного криптографічного перетворення. Наприклад моделі (16) і (17).

$$C_{30,57,106}(x) = \begin{bmatrix} (x_2 \cdot x_3)(x_1)(\overline{x_2 \cdot x_3}) \\ (x_1 \cdot \bar{x}_3)(x_2)(\overline{x_1 \cdot \bar{x}_3}) \\ (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2)(x_3)(\overline{\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2}) \end{bmatrix};$$

$$C_{30,57,106}'(x) = C_{45,54,106}(x) = \\ = \begin{bmatrix} (x_2 \cdot \bar{x}_3)(x_1)(x_2 \cdot \bar{x}_3) \\ (x_1 \cdot x_3)(x_2)(\overline{x_1 \cdot x_3}) \\ (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2)(x_2)(\overline{\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2}) \end{bmatrix}.$$

$$C_{30,77,120}(x) = \begin{bmatrix} (x_2 \cdot x_3)(x_1)(\overline{x_2 \cdot x_3}) \\ (\bar{x}_2 \cdot x_3)(x_1)(\bar{x}_2 \vee x_3) \\ (\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3)(x_1)(\overline{\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3}) \end{bmatrix};$$

$$C_{30,77,120}^{\setminus}(x) = C_{43,108,54}(x) = \begin{bmatrix} (x_1 \cdot \bar{x}_3)(x_2)(x_1 \vee \bar{x}_3) \\ (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3)(x_2)(\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3) \\ (x_1 \cdot x_3)(x_2)(x_1 \cdot x_3) \end{bmatrix}.$$

Наведені дискретно-казуальні моделі SET-операцію підтверджують гіпотезу про можливість на їх основі уніфікувати опис лінійних і нелінійних операцій криптографічного перетворення інформації.

Дані моделі спрощують подальший процес дослідження груп SET-операцій.

Необхідно відмітити, що дискретно-казуальне представлення дискретних функцій створює можливість будувати багатооперандні SET-операції, моделі яких поєднують в собі кортежі нелінійних, або лінійних і нелінійних SET-операцій.

Дане застосування дискретно-казуального моделювання є особливо перспективним.

На сьогоднішній день відомі моделі багатооперандних операцій які реалізують кортежі лінійних однооперандних SET-операцій. Моделі даних SET операцій будуються на основі додавання за модулем.

## Висновки

В процесі дослідження класифікованих груп 3Сі-квантових елементарних функцій було встановлено що групи елементарних функцій і як наслідок групи SET-операцій моделюються різним математичним апаратом.

Поєднання в SET-операціях елементарних функцій, які забезпечують лінійне і нелінійне перетворення вхідних Сі-квантів в вихідні приводить до складності моделей операцій. Застосування дискретно-алгебраїчного опису моделей забезпечує можливість однакового представлення як лінійні так і нелінійні SET-операцій. Дискретно алгебраїчного опису моделей виявився громіздким і не придатним для моделювання і дослідження багатооперандних SET-операцій. Запропонований дискретно-казуальний опис забезпечує спрощення моделей SET-операцій без втрати інформативності, а також забезпечує можливість моделювання багатооперандних SET-операцій, які поєднують в собі як лінійні так і нелінійні однооперандні SET-операції. Подальші дослідження будуть направлені на розробку методів синтезу багатооперандних SET-операцій і груп операцій з використанням дискретно-казуального представлення моделювання.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рудницький В. М., Лада Н.В., Мельник О. Г. Класифікація SET-операцій. Проблеми інформатизації Тези доповідей одинадятої міжнародної науково-технічної конференції (16-17 листопада 2023 року) Том 2: секції 3, 6 Баку – Харків – Бельсько-Бяла. 2023 с.35.
2. Бабенко Віра. Класифікація трирозрядних елементарних функцій для криптографічного перетворення інформації / Віра Бабенко, Ольга Мельник, Руслан Мельник // Безпека інформації: наук. журнал. – Київ : НАУ, 2013. – Том 19. – № 1. – С. 56–59. <https://jrn1.nau.edu.ua/index.php/Infosecurity/issue/view/220>.
3. Синтез елементарних функцій перестановок, керованих інформацією / В. М. Рудницький, Т. В. Миронюк, О. Г. Мельник, В. П. Щербина // Безпека інформації. – Т. 20, № 3. – Київ : НАУ, 2014. – С. 242–247.
4. Бабенко В. Г. Дослідження способів запису трьохрозрядних криптографічних операцій / В. Г. Бабенко, Р. П. Мельник, С. В. Рудницький // Системи управління, навігації та зв'язку : зб. наук. праць. – Вип. 1 (21), т. 2. – К. : Центр. наук.-досл. ін-т навігації і управл., 2012. – С. 170–173.
5. Рудницький В. М., Бабенко В. Г., Рудницький С. В. Метод синтезу матричних моделей операцій криптографічного кодування та декодування інформації. Зб. наук. пр. Харків. ун-ту Повітряних Сил. Харків: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2012. Вип. 4 (33). С. 198–200.
6. Бабенко В. Г., Мельник О. Г., Стабецька Т. А. Синтез нелінійних операцій криптографічного перетворення. Безпека інформації. 2014. Т. 20. №2. С. 143–147.
7. Миронюк Т. В. Визначення елементарних операцій базової групи перестановок, керованих інформацією / Т. В. Миронюк // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2016. – № 2. – С. 100–105.
8. Поспелов Д. А. Ситуационное управление : Теория и практика / Поспелов Д. А. – М. : Наука, 1986.

Received (Надійшла) 01.10.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.11.2023

## Discrete-casual presentation of models of elementary functions and set operations

V. Rudnitsky, V. Larin, O. Melnyk, D. Pidlasy

**Abstract.** The article proposes one of the promising directions for the development of low-resource cryptography, namely SET-encryption. The main advantage of SET encryption is the possibility of creating a technology for building ciphers with specified characteristics. A review of literary sources on the topic of the article was conducted. The need to create elementary functions in SET operations that provide linear and non-linear transformation of input C-quants into outputs is substantiated, which leads to the complexity of operation models. The use of a discrete-algebraic description of models provides the possibility of the same presentation of both linear and non-linear SET operations. The proposed discrete-casual description provides simplification of models of SET operations without loss of informativeness, and also provides the possibility of modeling multi-operand SET operations, which combine both linear and nonlinear single-operand SET operations. The discrete algebraic description of the models turned out to be cumbersome and not suitable for modeling and researching multi-operand SET operations.

**Keywords:** low-resource cryptography, SET encryption, information-driven operations, elementary functions, discrete-casual models, stream encryption.

Д. В. Сердюков, О. В. Северінов, З. М. Сидоренко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗГОРТАННЯ ЗАСТОСУНКУ ESET MDM/MDC ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ МОБІЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

**Анотація.** Предметом дослідження в статті є аналіз можливостей та процесу розгортання застосунку ESET Mobile Device Connector (MDC) з метою забезпечення безпеки та управління мобільними пристроями в корпоративних середовищах. В статті вирішуються наступні завдання: розгляд структури та складових функцій MDC системи, визначення основних проблем та недоліків під час активації продукту та конфігуруванні системи. Отримано наступні результати: розглянута структура роботи системи MDC, порядок її розгортання, виявлено недоліки під час інсталяції та способи їх вирішення, заблоковано загрози системою MDM. **Висновки:** Дослідження підтвердило, що встановлені політики та система MDM ефективно блокують вразливості та загрози на мобільних пристроях в корпоративних мережах, але вимагають правильних налаштувань та досвіду для успішного розгортання.

**Ключові слова:** MDM система, MDC система, віддалене керування мобільними пристроями, захист корпоративної інформації, СУІБ.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Відомо, що мобільні пристрої принесли багато користі організаціям у вигляді підвищення мобільності, доступу до інформації та зручності в роботі.

В будь-якому випадку співробітник за допомогою смартфона отримує доступ до інформації що обробляється в організації, починаючи від фотографій та клієнтів електронної пошти, закінчуючи застосунками з одноразовими ключами для двофакторної автентифікації.

Однак їхнє використання також вимагає ретельного планування і управління, щоб забезпечити безпеку та ефективність бізнес-процесів.

Крім того, користувачі мобільних пристроїв часто мають можливість пропускати оновлення додатків та операційної системи, встановлювати сторонні програми та підключатися до особистих і загальнодоступних мереж Wi-Fi. Хоча ці функції і допомагають користувачам, вони піддають дані на цих пристроях серйозному ризику витоку або крадіжки зловмисниками.

Ці вразливості безпеки стають більш тривожними, коли співробітники використовують власні смартфони, планшети та ноутбуки для доступу та обміну ІзОД не попереджуючи відділ інформаційної безпеки організації.

Одне порушення призводить до того, що організація не дотримується державних стандартів, нормативних документів і сплачує великі штрафи при першій же перевірці. Якщо, звісно, компанія не проводить внутрішній або зовнішній аудит інформаційної безпеки хоча б раз на рік та не виявляє дані порушення в ручному режимі [1].

Тому, для забезпечення захисту інформації, контролю встановлених застосунків, керування антивірусними системами та методами вводу, виводу інформації, використовують сервіси Mobile Device Management (далі - MDM).

**Метою даного дослідження** є аналіз можливостей та процесу розгортання застосунку ESET MDM/MDC для забезпечення безпеки мобільних пристроїв в корпоративних середовищах.

### Виклад основного матеріалу

**Структурна схема роботи MDC.** Mobile Device Connector (далі - MDC) – це частина ієрархії ESET PROTECT, яка забезпечує зв'язок між мобільними пристроями та самого веб-серверу ESET для використання функцій MDM. MDM – системи повного контролю за мобільними пристроями, Device Loss Prevention та Mobile Application Management є невід'ємною його частиною [2, 3].

На рис. 1 наведено структурну схему обміну даними між продуктами ESET PROTECT та мобільними пристроями [2].

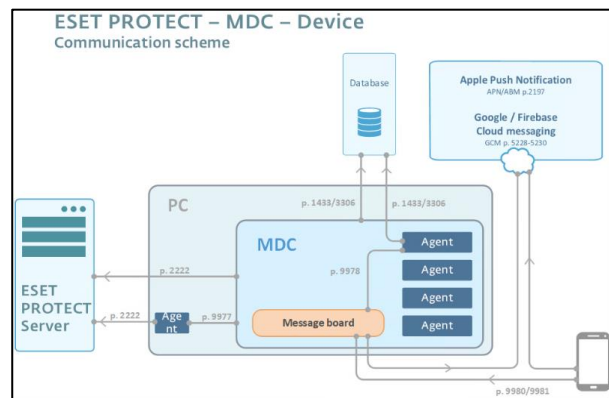


Рис. 1. Структурна схема роботи MDC

MDC – це рішення яке дозволяє керувати мобільними пристроями без агентів. Для збереження ресурсів мобільних пристроїв, агенти не працюють на самих пристроях.

Сервіс є хостом з віртуальними агентами. Дані для керування пристроями зберігаються у БД SQL. Сертифікат HTTPS необхідний для автентифікації обміну даними між мобільним пристроєм і MDC. Сертифікат проксі-сервера використовується для автентифікації зв'язку між сервером ESET PROTECT та MDC [2].

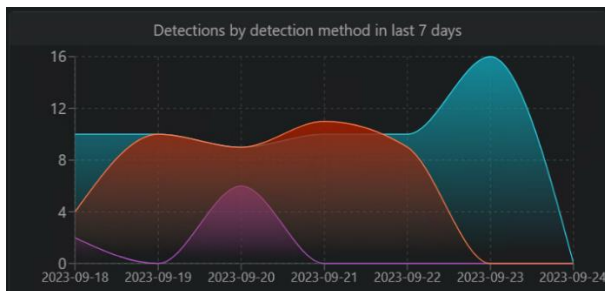
До керування пристроями Apple застосовуються додаткові вимоги, такі як спеціалізовані сертифікати, які необхідно підписувати довіреними центрами сертифікації Apple. На відміну від Apple, пристрої на

основі ОС Android не мають спеціальних умов до сертифікатів [4]. Через це переведення таких пристроїв на керування є простішим та займає менше часу.

**Аналіз реагування системи MDM.** Для аналізу реагування на вразливості, що виникають на мобільних пристроях підключених до мережі, були додані стандартні політики:

- міжмережвий екран;
- веб-захист;
- антивірус.

Всі вони спираються на існуючі правила і списки, які надає та оновлює в реальному часі репозиторій ESET. Ці правила і списки, можна створювати самостійно. В результаті проведених досліджень були отримані результати, що наведені на графіку реагування згідно встановленим політикам за період в 7 днів на 5 мобільних пристроях (рис. 2).



**Рис. 2.** Графік кількості заблокованих вразливостей за тиждень. (Фіолетовий – Антивірусний захист, Червоний – Веб-захист, Блакитний – міжмережвий екран)

На рис.3 можна переглянути результати дослідження кількості виявлених і заблокованих спроб порушення встановлених правил на мобільних пристроях за 31 день.

DETECTION CATEGORY	DETECTION TYPE	COU...	WARNING
Firewall	Security vulnerability exploitatio...	278	278
Web protection	An attempt to connect to URL	66	64
Antivirus	Application	6	6
Antivirus	Potentially unwanted application	1	1
Antivirus	Suspicious application	1	1

**Рис. 3.** Статистика виявлення з сортуванням за категорією правил

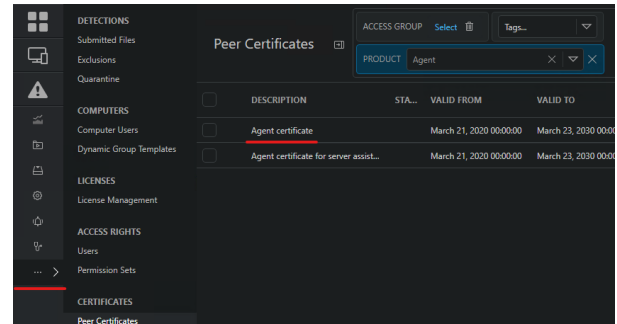
НСД, спроби доступу на небезпечні URL-адреси, потенційно небажані та підозрілі застосунки, експлуатація вразливостей були успішно заблоковані встановленими політиками на мобільних пристроях.

Але розгорнути ESET MDC адміністратору, який не мав досвіду з подібними сервісами, не так просто. При дослідженні були розроблені рекомендації щодо встановлення сервісу на Windows Server 2016 та підключення його до Веб-додатку. Далі розглянемо кроки інсталяції.

**Основні кроки інсталяції MDC.** В консолі ESET PROTECT отримуємо посилання до офіційного

репозитію, звідки можна завантажити інсталятор. Запускаємо інсталятор, ознайомлюємось з Ліцензійною угодою користувача та приймаємо її.

Далі необхідно підкріпити HTTPS сертифікат підписаний власним центром сертифікації ESMS Certification Authorities. Для цього потрібно відкрити веб-застосунок ESET Protect, в меню Certification Authorities згенерувати сертифікат Агента (рис. 4).

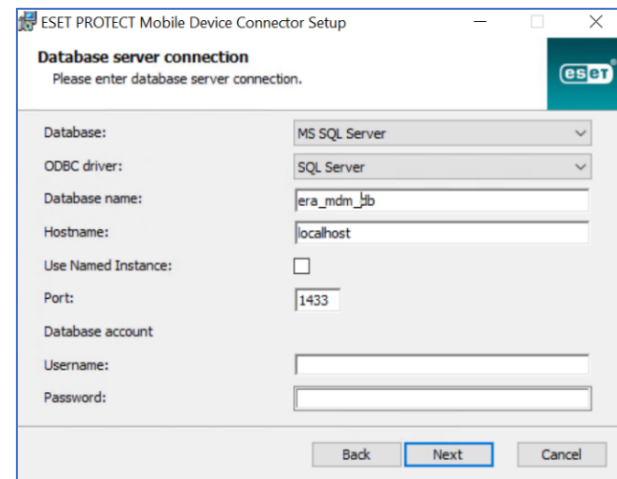


**Рис. 4.** Згенерований сертифікат

Прикріплюємо сертифікат до інсталяції. В наступному кроці адміністратори зазвичай стискаються з проблемою. Після першого налаштування основного серверу ESET Protect, який може налаштовувати інший адміністратор, рекомендується змінити стандартні порти доступу до БД. Новий адміністратор, що розгортає MDC пробує підключитись до бази даних по стандартному порту і не отримує доступу. Саме тому рекомендується розгорнути MDC на тій самій БД що й ESET Protect. era\_db – стандартна назва БД, а 1433 – стандартний порт підключення до неї. Замість цього, вам потрібно створити окрему базу даних під назвою era\_mdb поруч з основною era\_db, створити окремого адміністратора для цієї бази даних і змінити порт за замовчуванням для цієї нової бази даних. Також, необхідно замінити налаштування localhost на ім'я серверу куди встановлюється конектор, тобто, сервер ESET Protect.

Отже, ці заходи забезпечують безпеку та оптимізацію роботи системи ESET Protect та бази даних MDC.

На рис. 5 та 6 представлені налаштування за-замовчуванням – перший та бажані – другий.



**Рис. 5.** Налаштування за-замовчуванням

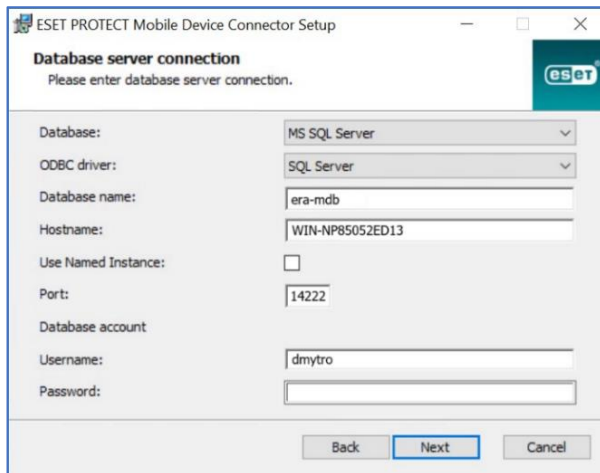


Рис. 6. Налаштування підключення до БД

Наступним кроком підключення до веб-серверу, порти залишаємо без змін, замінюємо server host відповідно до назви серверу організації (рис. 7).

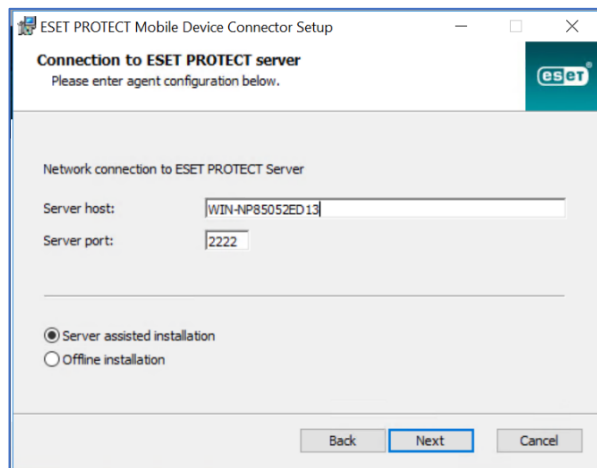


Рис. 7. Підключення до веб-серверу

На фінальному кроці треба надати облікові дані для підключення до веб-серверу. Проведені дослідження виявили, що облікові дані, на яких налаштовано двофакторну автентифікацію, не підтримуються (рис. 8). Виробник програмного забезпечення рекомендує одразу включити її після створення аккаунту.

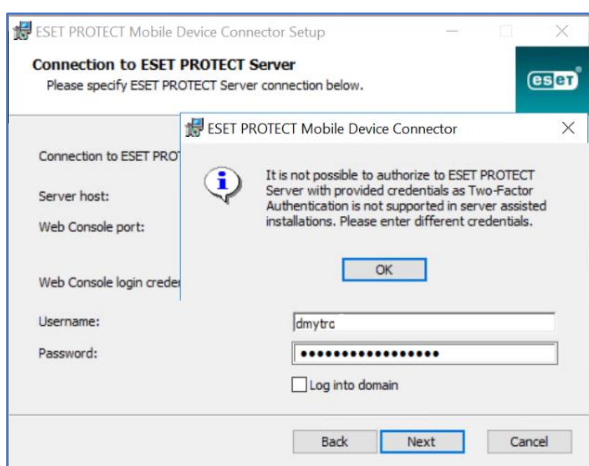


Рис. 8. Помилка під час доступу до серверу

Для подальшої інсталяції необхідно створити обліковий запис користувача для реєстрації на сервері. Права доступу обов'язково повинні бути Адміністративні. Заходимо на веб-сервер, в даному випадку <https://WIN-NP85052ED13/era/#id=USERS>, відкриваємо меню **Користувачі** та створюємо нового користувача **mdmuser** з Наборами дозволів **Administration permission set** без двофакторної автентифікації. Використовуючи нові облікові дані, маємо фінальний крок та підтверджуємо місце інсталяції застосунку. Після чого починається процес інсталяції (рис. 9). Після успішної інсталяції можна відкрити консоль віддаленого адміністрування. Переглянути сповіщення про стан системи (рис. 10).

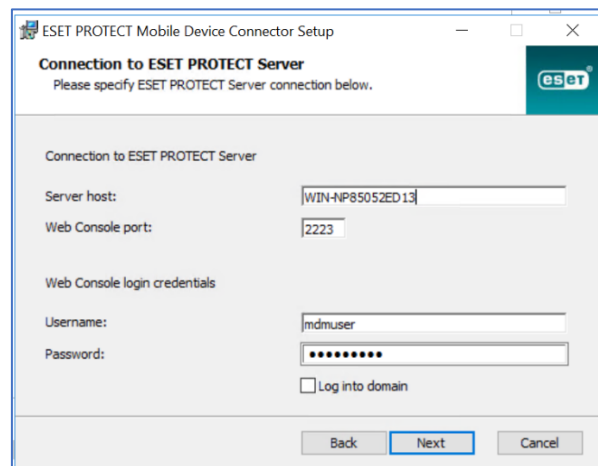


Рис. 9. Конфігурація підключення до веб-серверу та місця інсталяції

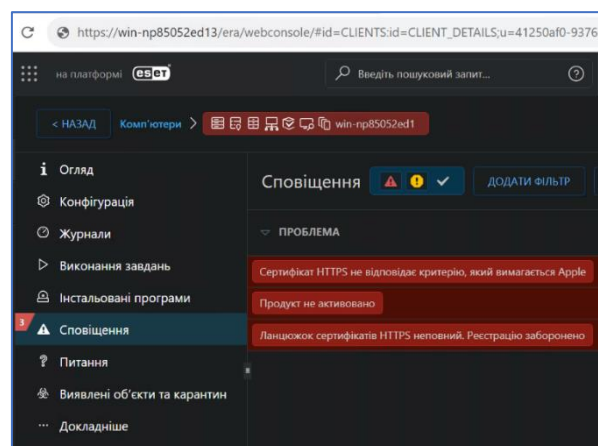


Рис. 10. Важливі сповіщення системи безпеки

Обов'язковою вимогою є активація продукту, окрема ліцензія не використовується, тільки основна, якою активовані інші продукти на даному сервері. Ліцензії купують на робочі станції або користувачів, їх можна переназначити на інші станції, у разі виходу з ладу або заміни. Тому купувати ліцензії з запасом не обов'язково, завжди можна докупити робочі місця або користувачів.

Перед реєстрацією мобільних пристроїв необхідно згенерувати сертифікати, що будуть відповідати критеріям Apple. Та доповнити ланцюжок сертифікатів HTTPS [5].



За даним методом інсталяції можна використовувати різні сертифікати: якщо організація має центр сертифікації, генерує та використовує власні сертифікати для веб-серверів, то даний сервіс підтримує використання сторонніх сертифікатів HTTPS. Але для пристроїв Apple, обов'язково, повинні бути створені сертифікати APN/ABM та підписані довіреним центром сертифікації Apple [5]. ESET має власний центр сертифікації ESET PROTECT, який може генерувати сертифікати однорангових вузлів для агентів [6].

**VPN – тунелювання.** Однією з ключових складових мобільної безпеки є забезпечення безпечного з'єднання між мобільними пристроями та серверами організації. У цьому контексті, використання віртуальної приватної мережі (VPN) виявляється дієвим інструментом для забезпечення захищеного зв'язку, який дозволяє уникнути можливих атак і перехоплення даних [7]. Завдяки використанню VPN, адміністратори можуть забезпечити безпеку та конфіденційність даних, що передаються між мобільними пристроями та серверами MDC [6]. VPN дозволяє створити захищене тунельне з'єднання, шифруючи дані та захищаючи їх від несанкціонованого доступу. Це особливо важливо в сферах, де зберігаються чутливі корпоративні дані, такі як персональні дані клієнтів, фінансові дані та інтелектуальна власність. Тому обов'язковою вимогою є підключення керованих мобільних пристроїв до корпоративної мережі та центру керування пристроями тільки через захищене тунельне з'єднання [7].

Додавання VPN до арсеналу заходів забезпечення безпеки в MDC підвищує рівень надійності та довіри до системи управління мобільними пристроями. Захищений зв'язок сприяє попередженню можливих атак і забезпечує безпеку даних під час їх пе-

редачі. Окремі системи також можуть використовувати автентифікацію при доступі до корпоративної мережі шифрування усього трафіку. Присутня можливість створювати для кожного додатка окремий VPN канал, що також забезпечує додаткову захищеність за умови використання загальнодоступних або ненадійних мереж [7].

### Висновки

У статті було розглянуто питання розгортання застосунку ESET Mobile Device Connector (MDC) для забезпечення безпеки та управління мобільними пристроями в корпоративних середовищах. Дослідження показало, що ефективне розгортання MDC може значно підвищити рівень безпеки та продуктивності в організаціях, де мобільні пристрої використовуються для роботи та обміну даними. За допомогою правильних налаштувань та практичних кроків, адміністратори можуть успішно розгорнути MDC, забезпечуючи відповідність стандартам безпеки та вимогам корпоративних нормативних документів. Важливими етапами є створення окремої бази даних для MDC, налаштування серверу та веб-серверу, а також генерація сертифікатів, що відповідають критеріям Apple. Додатково, активація продукту та належна конфігурація системи є важливими кроками для успішної роботи MDC. Організації повинні також враховувати можливість купівлі ліцензій в разі необхідності розширення обсягу захисту мобільних пристроїв. Загалом, розгортання MDC може бути ефективним інструментом для управління мобільною безпекою та підвищення продуктивності в сучасних корпоративних середовищах. Важливо дотримуватися найкращих практик та забезпечувати відповідність стандартам безпеки для досягнення успішних результатів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Why VPNs on mobile devices are a crucial part of securing access to corporate data - ManageEngine Blog. ManageEngine Blog. [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]-Режим доступу: <https://cutt.ly/V41SZjN>
2. MDM Setup and Settings Режим доступу: [https://help.eset.com/protect\\_admin/10.0/en-US/mdm\\_setup\\_and\\_settings.html](https://help.eset.com/protect_admin/10.0/en-US/mdm_setup_and_settings.html)
3. Нечволод К.В., Северінов О.В., Власов А.В. Аналіз безпеки даних в EMM системах / Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць 3.55 (2019): 131-134.
4. Нечволод, К.В., Северінов О.В. Аналіз захищеності системи Android для використання в корпоративному сегменті. 2019.
5. Обмеження MDM для пристроїв iPhone та iPad [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]-Режим доступу: <https://support.apple.com/uk-ua/guide/deployment/dep0f7dd3d8/web> (дата доступу: 24.09.2023).
6. Best Mobile Device Management (MDM) Software [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]-Режим доступу: <https://www.g2.com/categories/mobile-device-management-mdm> (дата доступу: 24.09.2023).
7. Сердюков Д.В., Северінов О.В., Сидоренко З.М. Безпечне підключення мобільних пристроїв до корпоративної мережі з використанням тунелю VPN. Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. – Том 1, 70 (2023).

Received (Надійшла) 15.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.11.2023

### Deployment features of ESET MDM/MDC application for mobile device security

D. Serdiukov, O. Sievierinov, Z. Sydorenko

**Abstract.** The article focuses on the analysis of capabilities and the deployment process of the ESET Mobile Device Connector (MDC) application with the aim of ensuring security and mobile device management in corporate environments. **The following tasks are addressed in the article:** an examination of the structure and components of the MDC system's functions, identification of key issues and drawbacks during product activation and system configuration. **The following results have been obtained:** the working structure of the MDC system is reviewed, the deployment process is outlined, installation issues are identified, and methods to address them are discussed. The MDM system effectively mitigates threats to mobile devices within corporate networks, although it requires proper configuration and experience for successful deployment.

**Keywords:** MDM system, MDC system, remote mobile device management, corporate information protection, ISMS.

D. Tyshchenko, T. Franchuk, R. Zakharov, I. Karpunin

State University of Trade and Economics, Kiev, Ukraine

## INNOVATION PARKS CREATION IN THE TERMS OF THE INFORMATION SPACE FUNCTIONING

**Abstract.** The article examines the leading principles of designing and creating innovative parks in Ukraine. The organizational and legal foundations of the organization of the innovation park were analyzed, the components of their infrastructure, components of the service provision system, as well as sources of financing were investigated. The purpose of the article is to analyze the prospects for the development of innovation parks in the conditions of the functioning of the information space. Prospective directions for the use of domestic and foreign experience of innovation parks in conditions of active development of the information space have been determined. The experience, history of creation, creation and development prospects and features of the implementation of innovation parks were analyzed, the possibilities of reorganization and development of modern innovation parks of Ukraine were determined, and ways of their improvement were proposed. The main conditions for creating a favorable environment are determined, the main approaches that have the greatest financial and economic efficiency in the chosen field of activity are determined, taking into account the current and modern requirements for the development of all branches of production, in particular, the field of information and telecommunication technologies. The main active projects and innovation parks in Ukraine, which are actively developing and have great potential, despite the difficult conditions in which the country has recently been, have been studied. It has been proven that modern science and innovation parks have one of the leading values, in particular, the processes and results of their interaction with leading companies in the IT industry, which affect the quality of training of specialists who will have relevant knowledge in the field of information and communication technologies, have been investigated.

**Keywords:** innovation park, information management system, information technologies, information technologies, startup.

### Introduction

The IT sector today is one of the major areas of social development. But there are also systemic problems that hold back this direction in Ukraine from even more rapid development. Let's analyze what these problems are and how they can be solved. There is a rapid increase in demand for specialists in the IT sector.

The personnel market cannot keep up with this growing need, and there are two main problems with the training of specialists: the IT field is relatively new and it is developing very quickly. The Law of Ukraine on Innovation Parks defines the legal and organizational principles for the creation and operation of innovation parks on the territory of Ukraine in order to ensure the development of the economy of Ukraine through innovation, the activation of innovative activities, the development of modern innovation infrastructure, the production and introduction of innovative products on the domestic and foreign markets [1-5].

#### Analysis of recent research and publications.

A number of scientists are paying attention to the problem of creating and developing innovation parks in Ukraine and the world.

Scientists study the experience of implementing modern innovative technologies in the leading countries of the world and prepare their own proposals for methods and means of developing innovation parks in the conditions of active development of the information space.

Rybytska O., Karpyak A., Bublyk M. in their numerous works study the issues of world and domestic experience in design, development, use,

future changes, development trends and implementation of modern means of information and communication technology implementation based on research and interpretation of the obtained results, which were made public at well-known sites and gatherings at the World Economic Forum [6].

Borodina O., Alyoshin S., Nosach O.B analyze the information society and the problems of the development of the informatization of the economy [7].

Melnyk M., Korcelli-Oleynichak E., Chorna N., Popadynets N. study the development of regional IT clusters in Ukraine through the prism of institutional and investment dimensions [8].

A. M. Hafiyak investigates the problems of business analytics and its connection with modern IT technologies, analyzes and improves the classification of information and analytical systems [7, 9, 10].

O. Krot analyzes technological revolutions of Ukraine, the experience of Ukraine and the world [11].

Chernyuk V. draws attention to the state and problems of science parks in Ukraine [12].

### Main part

It can be argued that innovation activity is a highly costly activity where it is impossible to do without a high degree of risk, which is caused by an increase in risk in the process of solving the assigned task. Insufficient stimulation of innovation activity leads to a lag in the development of all areas of science and practice, namely in the development and use of information technologies in all areas. According to the Draft Law of Ukraine "On Innovation Parks", they are considered as a state communal institution, which should be organized through the development of

scientific and technical or innovative activities [1-5, 13, 14]. Analyzing the main stages of the process of initiation, design and development of innovation parks for the implementation of cooperation between enterprises of various forms of ownership, which solve issues in all spheres of activity, in particular in the field of information and telecommunication technologies with the aim of accelerating the speed of economic growth of many enterprises and business development thanks to its support at the state level. It is the expansion of potential connections with specialists in this field and the provision of opportunities for implementation and development, in particular due to the identification of potentially profitable projects. Among the leading functional capabilities of innovation parks, the following can be distinguished [1-5]:

performing scientific and technical analysis of research for the purpose of implementing innovative ideas;

work on the creation of innovative products, implementation of a set of steps for their phased implementation in the medium and long term;

implementation of a set of actions regarding design, organization, implementation of innovative ideas in production;

search for sources and funds for financing innovative projects for the purpose of their implementation in scientific, industrial and other innovation parks;

provision of opportunities and support for the development of innovative activities of enterprises;

stimulation of innovation; ensuring the organization of mutual assistance of all subjects of the innovation environment;

creation of a comfortable environment for stimulating the increase in the efficiency of all types of scientific and technical activities affecting the totality of the combined processes of the innovation park;

development of a number of innovative projects to solve current issues affecting the development and implementation of a system of various researches and analysis of the implementation of innovative projects.

List of services provided by the innovation park looks as shown in Fig. 1.

Among the main types of innovation parks, scientific and technological, industrial, and economic companies are distinguished.

An innovation park can include a scientific and technological park, an industrial park, an innovation cluster, as well as other components of the modern infrastructure in the field of innovation.

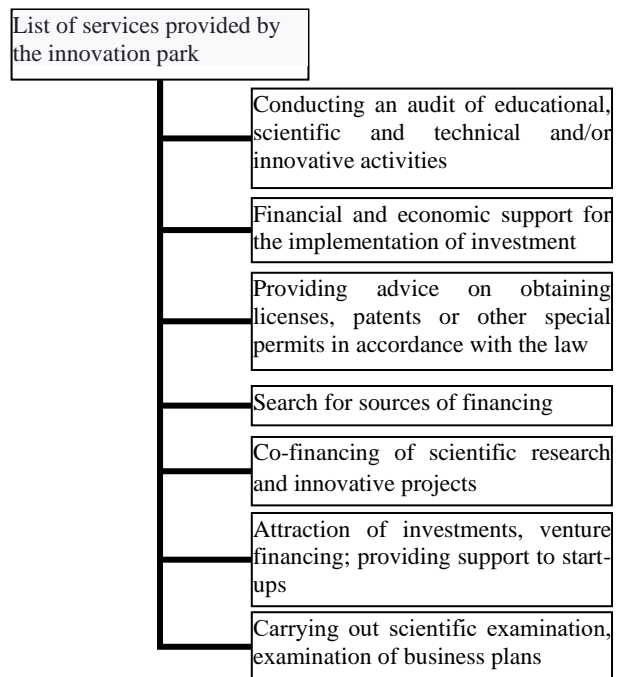
The essential conditions of the agreement on joint activity include:

the purpose of its conclusion;

information about the members of the innovation park;

rights and obligations of participants of the innovation park;

the responsibility of the participants of the innovation park for obligations arising in connection with participation in the innovation park or the implementation of projects of the innovation park,



**Fig. 1.** List of main services provided by the innovation park

the responsibility of the participant of the innovation park in the event of his exit from the innovation park before the completion of the implementation of the corresponding project, according to obligations, which arose during his participation in the contract;

priority activities of the innovation park; management bodies and the governing body;

the procedure for financing the activities of management bodies and the governing body;

the procedure for accepting new participants of the innovation park;

the procedure for terminating the agreement on joint activities.

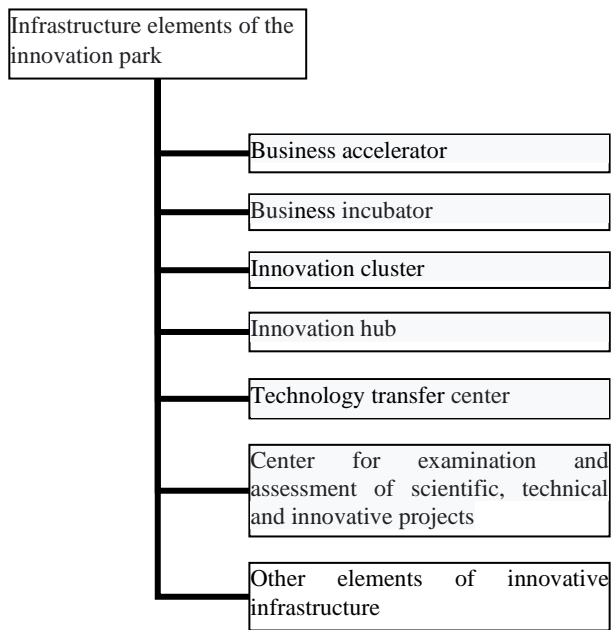
Among the components of the infrastructure of the innovation park, it is possible to single out the components of the modern one innovative, research and other infrastructure that help the successful conduct of scientific and technical, innovative and other entrepreneurial activities mediated by modern means of information and telecommunication technologies.

Schematically, the main components of the infrastructure of the innovation park are currently reflected in the components of the scheme shown in Fig. 2.

In the innovation park, the opportunity to lay the foundation for open innovation and limitless possibilities in the field of information technologies is important.

These opportunities are created thanks to the emergence and implementation of local ideas that have a global impact on the development of the information environment.

The success of an innovative technology company, in particular in the field of information technology, is only the first step in the modernization of all other companies and businesses of various industries.



**Fig. 2.** Infrastructure elements of the innovation park

Today, we have successful projects created by domestic specialists, but the main attention of scientists is directed to the means of improving them, changing

their scalability and increasing their number. Information about the most famous innovation parks of Ukraine is presented in Table 1 [14].

The development of modern innovations, which cause the development of technologies, provide an opportunity for their modification and implementation. Certain technical and technological means help to solve certain tasks, in particular, new modern office centers with infrastructure equipped for technological companies. Personnel issues also require attention and analysis.

The main idea of modern start-ups and innovations can be formulated so that today, development is mediated by rapid informatization processes in all fields, as a result of which knowledge is spread instantly.

The conducted analysis determines the expediency and necessity of further study of the proposed concept of modern innovations, in particular in the field of innovative technologies, the main purpose of which is the continuous encouragement of investors, specialists, scientists, stakeholders for further actions regarding the study of all relevant public requests for the introduction of innovative technologies, specifications and generalization obtained results of actions taken to solve the problem of financing ideas.

**Table 1 – The largest innovation parks of Ukraine**

Name of the park (City)	Year of establishment of the park	Area, thousand square meters
Unit.City (Kyiv)	2017	250
LvivTech.City (Lviv)	2020	60
Industrial equipment. Renovation (Ivano-Frankivsk)	2017	37,8
Bila Tserkva (Bila Tserkva)	2019	700
Ecopolis KhTZ (Kharkiv)	2020	500

The following points can be noted in the innovation park development strategy: support and implementation of flexible workspace for new and well-known enterprises; encouraging the continuous operation of business incubators and accelerators; systematic organization and holding of various seminars, meetings, networking; combination of specialists and investors around innovative ideas; organization of educational processes with the possibility of further professional development, internships in leading global and domestic companies.

The main tasks of the innovation park are to establish effective cooperation between educational institutions, businesses and the city community in order to speed up: development of new technological solutions; technology transfer; reengineering and creation of own innovative solutions; incubation and scaling of startups; creation of new jobs; modernization and transformation of educational services, due to the creation of a platform and material base for scientific research and joint projects. World experience shows that the economic growth of the developed countries of the

world and their individual regions is based on the field of knowledge and high technologies, the effective combination of which guarantees rapid progressive development. One of the most successful forms of such integration are innovation parks, which are characterized by a high level of innovative activity and represent a form of integration of science and production.

## Conclusions

Many investors investing in IT and operating in the international market have to look for workarounds, creating numerous risks for themselves. Therefore, in Ukraine, one of today's tasks is to create a favorable environment where people want to implement their knowledge and skills in the chosen field of activity, receive decent remuneration for their work and satisfy mandatory needs. These requirements are relevant for the development of all branches of production, in particular, the field of information and telecommunication technologies. This approach will bring positive changes throughout the economy. By

implementing at least a few of the above solutions, our country will have a chance to become an IT giant not only in our region, but also on a global scale. The number of such projects in Ukraine is growing rapidly. Because only through direct contact and interaction between students and existing IT companies can we develop new specialists who will have up-to-date knowledge and understand how the industry works in practice. That is why the development of science parks in the IT sector in Ukraine can lead to rapid growth of innovation in this area. Export of IT services is one of the largest categories of service exports in Ukraine. But

the problem is that most of the services provided are often outsourced. In other words, the market now works more to fulfill someone else's order, to create products based on someone else's ideas and for foreign owners. Parks compete with leading IT companies, startups, creative firms and even great corporations. The park provides its residents with a package of additional services for business development. The mission of innovation practice is to create a unique innovation platform where it will be easy for leading companies, start-ups and experts to find one, grow and grow, highlighting the quality of their products and services.

## REFERENCES

1. Проект Закону України про інноваційні парки URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/gromadske-obgovorennya/2021/10/13/Pro.innovatsiyni.parku/HO.projekt.ZU.Pro.innovatsiyni.parku.docx>
2. Проект Закону про внесення змін до Митного кодексу України щодо розвитку вітчизняного виробництва шляхом стимулювання залучення інвестицій в реальний сектор економіки через індустріальні парки URL: <http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc41?pf3511=58869>
3. Проект Закону про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо діяльності технологічних парків URL: [http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4\\_1?pf3511=55805](http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=55805)
4. Проект Закону про внесення змін до деяких законів України щодо активізації діяльності наукових парків URL: [http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4\\_2?id=&pf3516=4236&skl=10](http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_2?id=&pf3516=4236&skl=10)
5. Проект Закону про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо діяльності технологічних парків URL: [http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4\\_1?pf3511=55805](http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=55805)
6. Bublik M.I., Karpiak A.O., Rybyska O.M. The perspectives of IT industry development in Ukraine on the basis of data analysis of the world economic forum. Innovative management: theoretical, methodical, anapplied grounds. Pražský Institut zvyšování kvalifikace Prague institute for Qualification Enhancement. 2018. 115 -128.
7. Hafiak A.M., Borodina O.O., Alyoshin S.P., Nosach O.B. The Information Society and Informatization Development Problems of Economy. International Journal of Engineering & Technology. 7. (4.8). 2018. 364 – 369.
8. Melnyk M., Korcelli-Olejniczak E., Chorna N., Popadynets N. Development of Regional IT clusters in Ukraine: institutional and investment dimensions. Economic Annals-XXI, (173). 2018. 19-25.
9. Гафіяк А. М. ІТ-технології та бізнес-аналітика. Економіка та суспільство, 15. 2018. URL: [https://economyandsociety.in.ua/journals/15\\_ukr/143.pdf](https://economyandsociety.in.ua/journals/15_ukr/143.pdf)
10. Hafiak A., Borodina O., Diachenko-Bohun A. Application of genetic programming tools as a means of solving optimization problems. Control, Navigation and Communication Systems, 6 (52). 2018. 58–60.
11. Krot O. 8 technological revolutions of Ukraine. The seventh revolution: technology parks. URL: <https://project.liga.net/projects/tehnoparki/>
12. Чернюк В. Наукові парки в Україні – стан та проблеми діяльності. Теорія і практика інтелектуальної власності, 1. 2016. 68 – 75.
13. Innovative parks: the experience of Ukraine and the world URL: <https://business.ua/uk/innovatsijni-parki-dosvid-ukrajini-ta-svitu>
14. Innovation parks: what they are and where they will be created in Ukraine URL: <https://www.slovoidilo.ua/2021/04/16/infografika/suspilstvo/innovaczijni-parky-ce-vony-budut-stvoreniukrayini>

Received (Надійшла) 22.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.11.2023

### Створення інноваційних парків в умовах функціонування інформаційного простору

Д. Тищенко, Т. Франчук, Р. Захаров, І. Карпунін

**Анотація.** У статті досліджено провідні принципи проектування та створення інноваційних парків в Україні. Проаналізовано організаційно-правові основи організації інноваційного парку, досліджено складові їх інфраструктури, складові системи надання послуг, а також джерела фінансування. Метою статті є аналіз перспектив розвитку інноваційних парків в умовах функціонування інформаційного простору. Визначено перспективні напрямки використання вітчизняного та зарубіжного досвіду інноваційних парків в умовах активного розвитку інформаційного простору. Проаналізовано досвід, історію виникнення, створення та перспективи розвитку та особливості впровадження інноваційних парків, визначено можливості реорганізації та розвитку сучасних інноваційних парків України та запропоновано шляхи їх удосконалення. Визначено головні умови створення сприятливого середовища, визначено основні підходи, що мають найбільшу фінансово-економічну ефективність в обраній сфері діяльності, з урахуванням актуальних та сучасних вимог щодо розвитку всіх галузей виробництва, зокрема, сфери інформаційних і телекомунікаційних технологій. Вивчено основні діючі проекти та інноваційні парки в Україні, що активно розвиваються та мають великий потенціал, незважаючи на ускладнені умови, в яких останній час перебуває країна. Доведено, що сучасні наукові інноваційні парки мають одне з провідних значень, зокрема, досліджено процеси та результат їх взаємодії з провідними компаніями ІТ галузі, що впливають на якість підготовки спеціалістів, які матимуть актуальні знання в галузі інформаційно-комунікаційних технологій.

**Ключові слова:** інноваційний парк, інформаційна система управління, інформаційні технології, стартап.

В. В. Токарев<sup>1</sup>, І. В. Ільїна<sup>1</sup>, І. І. Шевченко<sup>2</sup>, І. К. Гриценко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

<sup>2</sup> Науково-дослідний, проектно-конструкторський та технологічний інститут мікрографії, Харків

## ПРО ОДИН ПІДХІД ДО РІШЕННЯ АСИМЕТРИЧНОЇ TSP - ЗАДАЧІ ПРИ В2С ДОСТАВКАХ ЗА ДОПОМОГОЮ ПЛАТФОРМИ "SWARM-BOT" - SYSTEM У ФІЗИЧНОМУ НЕОРГАНІЗОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

**Анотація.** На сьогоднішній день у сфері надання послуг, після проведеного аналізу ринку попиту та пропозицій, проводяться дослідження з метою визначення можливості застосування платформи "Swarm-bot" - system для доставки замовлень кінцевим користувачам. У ролі "s-bots", що входять до складу однієї "Swarm-bot" - system, активно застосовуються дроне. Доставка замовлень та кореспонденції з використанням платформи "Swarm-bot" - system передбачає наявність спеціалізованого контейнера, розміщеного на корпусі дроне. Дослідження проводяться для того, щоб з'ясувати чи зможуть дроне замінити поштове повідомлення до якого ми всі звикли. При впровадженні платформи "Swarm-bot" - system в реальну експлуатацію, людина бере участь у процесі доставки як оператор, а дроне переміщуються заздалегідь запрограмованим маршрутом. На сьогоднішній день найбільш оптимальним для вирішення проблеми зменшення відстані доставки замовлення є рішення асиметричної TSP - задачі (travelling salesman problem). Ця стаття присвячена дослідженню можливості застосувати алгоритм, заснований на методі "гілок та меж", для вирішення асиметричної TSP - задачі при В2С доставках за допомогою платформи "Swarm-bot" - system у physical unorganized environment.

**Ключові слова:** "Swarm-bot" - system, "s-bot", embedded systems, business-to-business, business-to-consume, drones, комунікація, метод "гілок та меж", асиметрична TSP - задача.

### Вступ

У сфері надання послуг, після проведеного аналізу ринку попиту та пропозицій, американська компанія Amazon стала застосовувати платформу "Swarm-bot" - system для транспортування замовлень клієнтам [1,2]. У ролі "s-bots", що входять до складу однієї "Swarm-bot" - system, Amazon застосувала дроне. Доставка замовлень та кореспонденції з використанням платформи "Swarm-bot" - system передбачає наявність спеціалізованого контейнера, розміщеного на корпусі дроне [3-6].

Після Amazon, всесвітньо відома міжнародна компанія доставки вантажів і документів, "DHL - express", стала активно проводити наукові дослідження з метою визначення можливості застосування платформи "Swarm-bot" - system для доставки замовлень кінцевим користувачам. Дослідження ведуться, щоб з'ясувати, чи зможуть дроне замінити поштове повідомлення, до якого ми всі звикли. Про проведення подібних досліджень, з метою визначення можливості застосування платформи "Swarm-bot" - system, після проведення ряду успішних тестових доставок покупцям, опублікували свої звіти пошти Швейцарії, Сингапура та Австралії. Також були відмічені експерименти "DHL - express" і в Україні. При впровадженні платформи "Swarm-bot" - system у реальну експлуатацію, людина бере участь у процесі доставки як оператор, а дроне переміщуються заздалегідь запрограмованим маршрутом. У загальному вигляді приклад алгоритму транспортування замовлень кінцевим споживачам може мати такий вигляд: крок №1 - замовлення покупця або кореспонденція розміщуються у спеціалізованому контейнері; крок №2 - у "Swarm-bot" - system програмується маршрут доставки та розрахунковий час у дорозі; крок №3 - дроне, що входять до складу "Swarm-bot" - system, готуються до руху за заданим маршрутом; крок №4 -

дроне здійснюють доставку замовлення клієнтам або кореспонденції в задану точку, орієнтуючись на сигнал GPS, і в процесі руху можуть уточнювати своє місце розташування в просторі через оператора "Swarm-bot" - system за допомогою проміжних наземних станцій.

На сьогоднішній день основні зусилля розробників та проектувальників платформи "Swarm-bot" - system спрямовані на вирішення наступних завдань: як масштабувати платформу, якщо мова йтиме не тільки про В2В (business to business), але й про В2С (business-to-consume) доставки; як і яким способом повідомити клієнта про майбутню доставку; як і в який спосіб клієнт повинен підтвердити отримання замовлення; як вирішити проблему гарантії доставки замовлення; як вирішити проблему зменшення часу доставки замовлення; як вирішити проблему зменшення відстані доставки замовлення.

На сьогоднішній день найоптимальнішим для вирішення проблеми зменшення відстані доставки замовлення є рішення асиметричної TSP - задачі (travelling salesman problem).

**Мета статті** - дослідити алгоритм, заснований на методі "гілок і меж" для вирішення асиметричної TSP - задачі при В2С доставках за допомогою "Swarm-bot" - system у physical unorganized environment.

### Виклад основного матеріалу

В даний час науково обґрунтовано, що рішення NP (non-deterministic polynomial – недетермінований поліном) - складних задач більш ефективно тоді, коли застосовується платформа "Swarm-bot" - system у цілому, а не окремі елементи, що входять до її складу, наприклад, окремі дроне [7-10]. Тоді, при застосуванні платформи "Swarm-bot" - system, значно скорочується час В2С - доставки замовлень за рахунок кількості дроне, що входять до складу цієї "Swarm-bot" - system. TSP - задача відноситься до класу NP - складних. У загальній постановці ця

задача полягає у пошуку гамільтонова циклу, з умовою, що у повному орієнтованому графі сума ваг дуг буде мінімальна. Серед метаевристичних алгоритмів найбільшою популярністю рішення TSP - задачі користується алгоритм "Lin-Kernighan", проте на сьогоднішній день більш велику популярність отримав алгоритм заснований на методі "гілок і меж".

**Постановка TSP - задачі.** Перша згадка про TSP - задачу в наукових публікаціях зафіксована на Віденській конференції в доповіді Karl Menger. У термінах теорії графів постановка TSP - задачі будується шляхом зіставлення: міст, які має відвідати комівояжер (у нашому випадку drone), з вершинами графа; маршрути, що з'єднують ці міста та вартість проїзду - з навантаженими дугами.

На виході виходить повноорієнтований асиметричний граф (G) на (n) вершинах без власних петель, заданий матрицею вартостей:

$$A = (a_{ij}), \quad (1)$$

де  $(a_{ij})$  формалізується як:

$$a_{ij} = \infty \forall i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

Тоді TSP - задача формулюється як задача пошуку гамільтонового циклу найменшої вартості на орієнтованому графі, який є несиметричною матрицею вартості A. При дослідженні TSP - задачі, були виділені три основні типи задач, кожна з яких має свою особливість.

*Перший тип - асиметрична TSP - задача.* TSP - задача називається асиметричною задачею, якщо дуги розглянутого орієнтованого графа є ребрами. Тоді для кожної пари міст вартість проїзду в один бік та назад не збігаються. *Другий тип - симетрична TSP - задача.* Коли дуги орієнтованого графа представлені ребрами, а для кожної пари міст вартість проїзду в один бік та назад збігаються, то така TSP - задача називається симетричною. Провідні зарубіжні дослідники A. Jonker і T. Volgenan при розробці алгоритмів дійшли висновку, що будь-яку асиметричну TSP - задачу можна перетворити на симетричну TSP - задачу. Таке перетворення дозволяє застосувати, отриманий в результаті експерименту заділ, для вирішення асиметричної TSP - задачі. *Третій тип - метрична TSP - задача.* Якщо уявити симетричну TSP - задачу у вигляді нерівності:

$$a_{ij} \leq a_{ik} + a_{kj} \forall i, j, k = \overline{1, n} (i \neq j, k \neq i, k \neq j), \quad (3)$$

то можна припустити, що в задачах такого класу непрямі шляхи завжди більші за прямі шляхи. При такому затвердженні TSP - задача називається метричною.

### Огляд алгоритмів розв'язання асиметричної TSP - задачі

**Точні алгоритми розв'язання асиметричної TSP - задачі.** Група дослідників Dantzig G., Fulkerson R. та Johnson S. запропонували універсальний "алгоритм - Гоморі" для вирішення TSP - задачі. Трохи пізніше цей алгоритм стали застосовувати для вирішення завдань

цілочисленного програмування, але було відзначено, що час роботи "алгоритму - Гоморі" є довгим. Для усунення цієї проблеми вчені M. Held та R. Karр і, незалежно від них R. Bellman, запропонували ряд кроків щодо усунення цього недоліку. Результатом цієї роботи з'явилася пропозиція – застосувати метод динамічного програмування для вирішення асиметричної TSP – задачі, який надалі отримав назву "алгоритм - Held - Karр". Під час проведення багаторазових експериментальних досліджень in a physical unorganized environment, було встановлено збільшення швидкості цього алгоритму порівняно з "алгоритмом - Гоморі", але виявився недолік, який вимагав більшого обсягу оперативної пам'яті обчислювальних пристроїв.

Після проведення ряду вдалих експериментів, відомі дослідники Little J., Murty K., Sweeney D. та Karel C. запропонували використовувати метод "гілок і меж" для вирішення асиметричної TSP - задачі. Перша вдала модифікація цього методу була продемонстрована науковій громадськості вченими Padberg M. і Rinaldi G. Ця модифікація була схвалена і отримала назву – метод "гілок та відсічень". Далі було проведено ряд експериментів, після яких цей метод став успішно застосовуватися для вирішення TSP - задачі великої розмірності [11-13].

### Наближені алгоритми розв'язання асиметричної TSP - задачі.

Оскільки асиметрична TSP - задача відноситься до класу NP - складних, то це означає, що якщо гіпотеза про нерівність класів P і NP вірна, то на сьогоднішній день не існує точного поліноміального алгоритму для розв'язання TSP - задачі. У зв'язку з цим після проведення низки досліджень стала актуальною пропозиція застосування наближених алгоритмів (у науковій літературі вони відомі як евристичні алгоритми або метаевристичні алгоритми) для вирішення TSP - задачі. Хоча, як показали кінцеві результати, отримані під час проведення низки експериментів, наближені алгоритми не гарантують точного рішення, але вони здатні із задовільною похибкою знайти рішення, досить близьке до точного за прийнятний час (на думку дослідників).

При проведенні огляду та аналізу наукових публікацій у цій галузі було встановлено, що наближені алгоритми вирішення TSP - задачі поділяються на три базові сімейства алгоритмів.:

- перше сімейство – "жадібні алгоритми";
- друге сімейство – "swarm алгоритми";
- третє сімейство – алгоритми, спрямовані на покращення рішення.

У першому сімействі широку популярність серед представників "жадібних алгоритмів" отримав алгоритм "найближчих сусідів". Але при проведенні досліджень було встановлено, що похибка кінцевого результату більшості "жадібних алгоритмів" дуже висока. У розвиток другого сімейства "swarm алгоритмів" великий внесок зробили роботи таких відомих вчених, як M. Dorigo - "мурашиний алгоритм", Hamed Shah-Hosseini - алгоритм "краплі дощу" та T. Sato - "бджолиний алгоритм". У розвиток третього сімейства наближених алгоритмів свій внесок внесли такі відомі вчені, як S. Lin - алгоритм "λ-opt", C. Rego - алгоритм "Tabu search" і

В. Kernighan - алгоритм "Lin - Kernighan".

**Алгоритм, заснований на методі "гілок і меж", для вирішення асиметричної TSP - задачі.**

Головна ідея методу "гілок і меж" полягає у поділі безлічі допустимих рішень на підмножини. Потім виконуються подальші скорочення перебором. Ця процедура називається – розгалуженням. З кожною такою підмножиною існує пов'язана оцінка, яка називається – нижня межа при пошуку мінімуму. Ця оцінка забезпечує відсікання підмножин, що не містять оптимального рішення. Ця процедура називається – побудовою меж. Таким чином, за допомогою методу "гілок і меж" дослідник приходять до деревоподібної моделі простору рішень. У нашому випадку такою вихідною множиною є безліч "всіх можливих рухів по маршруту", на якій мінімізується цільовий функціонал, що задає вартість "всіх можливих рухів по маршруту". При проектуванні алгоритмів розробники програмного забезпечення мають передбачити такі кроки: крок № 1 - операція переходу при виконанні чи невиконанні певної умови; крок № 2 - вибудовування меж.

Операція переходу при виконанні або невиконанні певної умови, яка починається з кореня, включає в себе дію пошуку дерева рішень. Тоді можна стверджувати, що корінь дерева рішень складається з множини  $K$  всіх  $(n-1)!$  "можливих рухів по маршруту". Завдання передбачає наявність якоїсь кількості міст  $n$ . Операція переходу виконується за алгоритмом вибору однієї дуги, наприклад  $(m, l)$ , з безлічі дуг, що виходять із кореня. Проектувальники алгоритму на основі методу "гілок і меж" запропонували ідею - розбити вихідну множину "всіх можливих рухів по маршруту" на дві множини:

- перша множина - включає в себе рух по оптимальному маршруту;
- друга множина - не включає в себе рух по оптимальному маршруту.

Для того щоб ця ідея спрацювала, проектувальники розробили особливий алгоритм визначення дуги  $(m, l)$ , яка входить до "оптимального руху по маршруту". Множина  $K$  поділяється на дві множини: множина  $\{m, l\}$ , до якої входять всі "рухи по маршруту" із  $K$ , які містять цю дугу, тобто проходять через неї; множина  $\overline{\{m, l\}}$  - "рухи по маршруту", які не містять цю дугу.

Коли операція переходу при виконанні або невиконанні певної умови організована так, що здійснюється вибір "правильної" дуги, то перехід закінчується після  $n$  ітерацій, рис. 1.

Вибудовування меж. Число 11, яке знаходиться в корені дерева рішень, позначає нижню межу вартості "всіх можливих рухів по маршруту". На наступному етапі алгоритму проектувальники запрограмували вибір дуги для операції переходу. Тоді, множина "всіх можливих рухів по маршруту" поділяється на множину "рухів по маршруту", які містять дугу  $(1, 4)$ , на рис. 1 позначається як  $1 \rightarrow 4$ ; множину "рухів по маршруту", які не містять дугу  $(1, 4)$ , на рис. 1 позначається як  $1 \not\rightarrow 4$ .

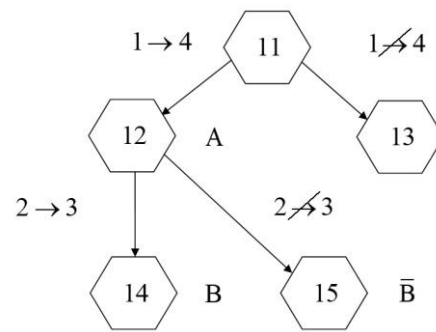


Рис. 1. Фрагмент дерева вибору "правильної" дуги

Далі, згідно з логікою роботи алгоритму, відбувається вибір множини "рухів по маршруту". Вона відноситься до вершини з нижньою межею 12. Тоді цю множину можна розділити на наступні підмножини:

- підмножина №1 - містить у собі дугу  $(2, 3)$ ;
- підмножина №2 - не містить у собі дугу  $(2, 3)$ .

На рис.2 прийняті наступні позначення:

- $B$  – множина, яка є підмножиною "рухів по маршруту" із  $A$ , що проходять через дугу  $(m, l)$ ;
- $\overline{B}$  – множина, яка є підмножиною "рухів по маршруту" із  $A$ , що не проходять через дугу  $(m, l)$ .

З кожною вершиною дерева зв'язується нижня межа вартості будь-якого "руху по маршруту" з цієї множини. Тоді можна стверджувати, що завдання полягає в отриманні якомога точніших нижніх меж.

### Висновки

При проведенні огляду та аналізу наукової літератури було встановлено, що на сьогодні не існує однозначного алгоритму розв'язання асиметричної TSP – задачі, який міг би надати кінцевий результат за прийнятний час з використанням допустимого обсягу оперативної пам'яті обчислювальних пристроїв у реальному часі. І, швидше за все, такого алгоритму немає. Навіть при тому недоліку, що час, який витрачається обчислювальними пристроями для точного розв'язання асиметричної TSP - задачі великий, а для великих розмірностей і зовсім недосяжний, бізнес-потреби вирішення цього завдання на сьогодні залишаються актуальними. Оптимізуючи свої дії, дослідники для досягнення кінцевого результату вирішили вдатися до модифікації рішення асиметричної TSP - задачі. При проведенні експериментальних досліджень у physical unorganized environment Хороші результати при розв'язанні асиметричної TSP - задачі показали наближені алгоритми. Хоча вони мають певну похибку при вирішенні асиметричної TSP - задачі, але, як показали кінцеві результати - вартість знайденого шляху руху близька до вартості оптимального шляху руху, а час, який витрачає обчислювальний пристрій на рішення асиметричної TSP - задачі, є досить прийнятним. Як було встановлено при проведенні серії експериментів, жертвуючи точністю при отриманні кінцевого результату, досить швидко виникає гамільтонів цикл, що в більшості випадків є необхідною і достатньою умовою та задовольняє потребам дослідників. Але,



незважаючи на позитивні кінцеві результати вирішення асиметричної TSP - задачі, отримані за допомогою наближених алгоритмів, при проведенні експериментальних досліджень в physical unorganized environment, дослідники вирішили не відмовлятися від застосування точних алгоритмів розв'язання асиметричної TSP - задачі, навіть якщо це пов'язано з такими недоліками, як час роботи обчислювального

пристрою, так і ресурси об'ємів пам'яті, що витрачаються. Тому, проведений огляд та аналіз наукової літератури та проведені наукові дослідження, підтвердили подальшу необхідність у удосконаленні алгоритму, заснованого на методи "гілок та меж", для вирішення асиметричної TSP - задачі при B2C доставках за допомогою платформи "Swarm-bot" - system у physical unorganized environment.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Koshovyi M. D., Pylypenko O. T., Ilyina I. V., Tokarev V. V. Growing tree method for optimisation of multifactorial experiments, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2023, № 3, pp. 55–61. Doi: 10.15588/1607-3274-2023-3-6.
2. Koshevoy N., Ilina I., Tokariyev V., Malkova A., Muratov V. Implementation Of The Gravity Search Method For Optimization By Cost Expenses Of Plans For Multifactorial Experiments, *Radioelectronic and Computer Systems*, 2023, №. 1(105), pp. 23-32. Doi: 10.32620/reks.2023.1.02.
3. Кривуля Г.Ф., Токарев В.В., Іліна І.В., Кравець В.С. Взаємодія між «s-bots» однієї «Swarm-bot» system у фізичному неорганізованому середовищі, *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2023, №1(71), с.108-111. Doi: 10.26906/SUNZ.
4. Krivoulya G., Koshevoy N., Tokariyev V., Ilina I., Dubinsky D. Solving the Task of Topological Formation Intelligent Mobile «S-bots» for One «Swarm-bot» System, *Proceedings of the 7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems: (COLINS 2023)*. CEUR Workshop Proceedings, 2023. Kharkiv. Ukraine, pp. 273-282.
5. Krivoulya G., Tokariyev V., Ilina I., Lebediev O., Shcherbak V. Algorithm of Iterations of Distribution of Subtasks Between «S-Bot» in One «Swarm-Bot» System, *Proceedings of the 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems: (COLINS 2022)*. CEUR Workshop Proceedings, 2022. Gliwice. Poland, pp. 1531-1541.
6. Krivoulya G., Ilina I., Tokariyev V., Shcherbak V. Mathematical Model for Finding Probability of Detecting Victims of Man-Made Disasters Using Distributed Computer System with Reconfigurable Structure and Programmable Logic, *IEEE Int. Scientific-Practical Conf. Problems of Inf., Science and Technology: (PIC S&T)*, 2020. Kharkiv. Ukraine, pp.573 - 576.
7. Serkov A., Kravets V., Yakovenko I., Churyumov G., Tokariyev V., Nannan W. Ultra Wideband Signals in Control Systems of Unmanned Aerial Vehicles, *The 10th IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies: (DESSERT'2019)*, 2019. Leeds. England, 2019, pp.26 - 29.
8. Serkov A., Pustovoitov P., Yakovenko I., Lazurenko B., Churyumov G., Tokariyev V., Nannan W. Ultra wideband technologies in mobile object management systems, *Сучасні інформаційні системи*, 2019, т.3, №2, сс. 22-27.
9. Serkov A., Breslavets V., Tolkachov M., Kravets V. Method of coding information distributed by wireless communication lines under conditions of interference, *Advanced Information Systems*, 2018, vol.2, no.2, pp. 145-148. Doi:10.20998/2522-9052.2018.2.25.
10. Серков О.А., Князев В.В., Лазуренко Б.О., Яковенко І.В., Чурюмов Г.І., Токарев В.В. Надширококумові технології в задачах забезпечення електромагнітної сумісності рухомих об'єктів, *Збірник 4 міжн. НТК Проблеми електромагнітної сумісності перспективних бездротових мереж зв'язку: (EMC-2019)*, 2019. Харків. с.55 - 57.
11. T. Gao, X. Bai. Bayesian. Optimization-based Three-dimensional, Time-varying Environment Monitoring using an UAV, *IEEE Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2022, vol.105, no.4, pp.219 - 235. Doi:10.1007/s10846-022-01709-x.
12. Han, J. Jiang, C. Yu. Distributed Fault Estimation and Fixed-Time Fault-Tolerant Formation Control for Multi-UAVs subject to Sensor Faults, *IEEE J. of Intelligent & Ro. Syst.*, 2022, vol.104, no.4, pp.310 - 325. Doi:10.1007/s10846-022-01698-x.
13. K. Muhammad, A. Ullah, J. Lloret. Deep Learning for Safe Autonomous Driving: Current Challenges and Future Directions, *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2021, vol.22, no.7, pp.4316 - 4336. Doi:10.1109/TITS.2020.3032227.
14. L. Zhao, Y. Song, C. Zhang. T-GCN: A Temporal Graph Convolutional Network for Traffic Prediction, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, vol.21, no.9, pp.3848 - 3858. Doi:10.1109/TITS.2019.2935152.
15. E. Seraj, A. Silva, M. Gombolay. Multi-UAV planning for cooperative wildfire coverage and tracking with quality-of-service guarantees, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, article number.39, 2022, Springer. Doi:10.1007/s10458-022-09566-6.

Received (Надійшла) 15.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.11.2023

**Interaction between «s-bots» one «Swarm-bot» system in a physical unorganized environment**

V. Tokariyev, I. Ilina, I. Shevchenko, I. Hrytsenko

**Abstract.** Today, in the field of service provision, after an analysis of the supply and demand market, research is being conducted to determine the possibility of using the "Swarm-bot" - system platform for delivering orders to end users. In the role of "s-bots", which are part of one "Swarm-bot" - system, drones are actively used. Delivery of orders and correspondence using the "Swarm-bot" - system platform implies the presence of a specialized container placed on the drone body. Research is being conducted to see if drones can replace the email messages we're all used to. When implementing the "Swarm-bot" - system platform into real operation, a person participates in the delivery process as an operator, and drones move along a pre-programmed route. Today, the most optimal way to solve the problem of reducing the order delivery distance is to solve the asymmetric TSP problem (travelling salesman problem). This article is devoted to exploring the possibility of applying an algorithm based on the "branch-and-bound" method to solve an asymmetric TSP problem in B2C deliveries using the "Swarm-bot" - system platform in a physical unorganized environment.

**Keywords:** "Swarm-bot" - system, "s-bots", embedded systems, business-to-business, business-to-consume, drones, communication, branch-and-bound method, asymmetric TSP - problem.

В. С. Харченко, О. О. Івасюк

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

## ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ВЕРИФІКАЦІЇ FMEDA/FIT ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ КІБЕРБЕЗПЕКИ ПРОГРАМОВНОГО ЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЕРА

**Анотація.** З кожним роком зростає кількість атак на критичну інфраструктуру, яка відіграє ключову роль у життєдіяльності людини. Основною ціллю зловмисників при здійсненні такого типу кібератак є програмовані логічні контролери, які використовуються для побудови ІКС технологічних процесів. Як правило, до такого типу ІКС та програмованих логічних контролерів висуваються вимоги щодо забезпечення функційної безпечності, яка оцінюється шляхом проведення FIT на базі FMEDA. А для оцінювання рівня кібербезпеки програмованого логічного контролеру використовується PnT на базі ІМЕСА. Таким чином, для оцінки рівня функційної безпечності та кібербезпеки необхідно прикладати подвійні зусилля. Але у той же час, слід враховувати значні часові та фінансові інвестиції для визначення ступеня відповідності навіть до однієї з них. Тому, задача обґрунтування можливості використання вже отриманих результатів, щодо відповідності вимогам функційної безпечності для оцінки рівня кібербезпеки програмованого логічного контролеру є актуальною і такою, що має практичне значення. У статті розглядаються питання оцінювання рівня кібербезпеки SPLC, побудованих на основі використання технології FPGA. SPLC відповідають вимогам функційної безпечності рівня SIL-3 і вони є ядром ІКС, на які покладається завдання по забезпеченню безпечного управління критичними технологічними процесами. Обґрунтовується можливість використання результатів FIT на базі FMEDA для апаратної частини SPLC у якості результатів виконання PnT на базі ІМЕСА. Введена метрика для оцінки загальної кількості апаратних відмов, які одночасно можуть бути розглянуті у якості кібератак. За обраним показником була виконана оцінка результатів FMEDA для одного з модулів SPLC. Використання запропонованого підходу надає змоги економії мінімум 240 людино/годин.

**Ключові слова:** функційна безпечність, кібербезпека, апаратний дефект, кібервразливість.

### Вступ

**Мотивація.** Останні десятиліття визначаються всеосяжним переходом від аналогових технологій до цифрових, суцільною дигіталізацією та інтелектуалізацією промислових систем, в контексті впровадження концепцій Індустрія 4/5.0. Якщо в деяких сферах цей процес відбувається швидко та всебічно, то у галузях, критичних для безпеки людини, такі процеси є доволі повільними, з огляду на їх більш консервативний характер. Інформаційно-керуюча система (ІКС) є одним із ключових елементів у забезпеченні безпечного та контрольованого перебігу технологічних процесів, небезпечних для людини. Тому, до таких систем висуваються високі вимоги, щодо забезпечення надійності, функційної безпечності та кібербезпеки.

Цифрові системи стикаються з новими видами загроз - кіберзагрозами, які не були актуальними для аналогових систем. У [1] показано, що рівень кібератак ІКС збільшився на 41% за першу половину 2021, і з них 71% класифікувались як серйозні або критичні. Яскравим прикладом кібератаки на промислово-інфраструктуру став інцидент з трубопроводом Cologne Pipeline у 2021 [2]. Прикладом однієї з останніх потужних атак, яка відбулась наприкінці серпня 2023р., є атака на компанію Energy One Limited, яка є постачальником програмного забезпечення для енергетичних компаній [3]. У той же час, дослідження свідчать, що менше половини (44%) респондентів вищої ланки вважають, що їм необхідно провести термінові поліпшення в найближчі кілька років, щоб запобігти серйозній атаці на їхній бізнес, а більш як третина (35%) фахівців у галузі енергетики стверджують, що їхнім компаніям доведеться зіткнутися з серйозним інцидентом, перш ніж інвестувати у свій захист [4]. Це має пояснення, оскільки забезпечення і підтримка

високого рівня кібербезпеки потребує постійних та значних інвестицій. Тому, задача пошуку шляхів, які надають змогу виконати, хоча б часткове оцінювання кібербезпеки продукту без залучення великих додаткових інвестицій, за рахунок використання вже отриманих результатів, стосовно інших складових безпеки, зокрема, функційної безпечності, є актуальною і має суттєву практичну користь.

**Аналіз публікацій** розпочнемо з висловлювання Caitie McCaffrey з Microsoft Research, яке стисло передає важливість та необхідність тестування шляхом засіву дефектів: «Ви ніколи не дізнаєтесь, яким чином поведе себе система під час збою або нештатної ситуації, до тих пір, поки не відтворите її».

Як сказано у [5], серія стандартів IEC 62443 була розроблена для забезпечення безпеки систем промислової автоматизації та управління протягом усього їхнього життєвого циклу. Наразі, він включає дев'ять стандартів, технічних звітів і технічних специфікацій. У стандарті IEC 62443 застосовується підхід до кібербезпеки, що ґрунтується на оцінці ризиків, який заснований на концепції, згідно з якою спроби захистити всі активи однаковою мірою, не є ні ефективними, ні стійкими. Він стосується не тільки технології, що входить до складу системи керування, а й робочих процесів, заходів протидії та співробітників [5].

У [6-10] визначені підходи оцінки кібербезпеки систем, речей та процесів через виконання тестування на проникнення (PnT – penetration testing). Наведені основні етапи, з яких складається виконання такого тестування та графічні схеми їхньої послідовності і взаємозв'язку. Надається стисле описання змісту кожного з етапів. Але, переважно досліджується сегмент інтернету речей, комп'ютерних бездротових мереж та системи забезпечення з якості підприємств, яке характеризується використанням комерційних засобів.

У статті [11] наводяться детальні приклади розробки коду для конфігурації мікросхем ASICs. Досліджуються кейси із імплементацією у код апаратної закладки на етапі розробки. Особливістю такого типу мікросхем є те, що вони не можуть бути ні переконафігуровані, ні стерті користувачем. Тому єдине, що в такому випадку є у користувача, це проведення тестування готового рішення за методом «black box». Таким чином, користувач отримує виріб, який при настанні «тригерної» події, наприклад, натискання певної послідовності кнопок, активує «апаратну закладку». Хоча автор і продемонстрував «непомітність» такої закладки, але вона може бути досить легко знайдена на етапі верифікації коду, в рамках побудови функційно-безпечних PLC, згідно вимог IEC 61508. Додатково, слід відмітити, як даний матеріал яскраво демонструє ризики використання програмних продуктів третьої сторони.

У [12] надано детальний опис техніки засіву дефектів для відтворення одиничних апаратних відмов комірок пам'яті у FPGA (field-programmable gate array), які мають назву «soft fault» і характеризуються зміною значення біта, що зберігається. Техніка розроблена для тестування FPGA з використанням static random access memory, які виготовляє фірма Xilinx. Засів дефектів проводиться з використанням спеціально призначеного програмного забезпечення (soft error mitigation) з використанням (intellectual property core.). Ця техніка пристосована виключно для FPGA, фірми Xilinx і може бути використана для перевірки одного типу дефектів. У той же час, у статті наведені рівні, на яких засів може відбутися, а саме: апаратний (безпосередній вплив на комірку пам'яті), програмний (закладка у файлі конфігурації, яка активується у разі настання тригерної ситуації) рівень симуляції (створення моделі комірок пам'яті, за допомогою Hardware Description Language та їхня перевірка) та рівень емуляції (коли відбувається внесення дефекту безпосередньо в «розгорнутий» у FPGA код, за допомогою спеціального інструментарію). Також ці чотири методи засіву дефектів аналізувались у [13].

У стандарті IEC 61508 розглядаються шляхи забезпечення функційної безпеки електронних і програмованих електронних пристроїв, і оцінюється парировання випадкових одиничних апаратних відмов [14, 15]. У той же час, стандарт не надає інформації яким чином здійснити імітації таких відмов та нічого не говориться про кібербезпеку таких пристроїв. Пристрій може бути безпечним, але чи можемо ми довіряти його реакціям?

В існуючому на даний час єдиному стандарті по засіву дефектів (fault injection testing, FIT) [16] описується методологія для оцінки надійності та безпечності цифрових систем керування у ядерних енергетичних установках, за допомогою впровадження помилок (дефектів). Розглядаються методи застосування даного інструментарію для оцінки ІКС, які побудовані або на FPGA технології, або на основі мікропроцесорів. Але у стандарті не розглядається можливий зв'язок між апаратними відмовами та кібервразливостями.

У роботах [17-19] висвітлюється близькість функційної та інформаційної безпечності комп'ютерних

систем, які керують критичними технологічними процесами. Набір інструкцій по практичній реалізації засіву дефектів та приклади їхньої імплементації під час тестування програмованого логічного контролера (ПЛК, programmer logical controller – PLC) було надано у [20, 21].

Висновок: єдиним шляхом перевірки поведінки системи під час виникнення апаратного дефекту або намагання зловмисника скористатись апаратною вразливістю, є виконання тестів, які відтворюють ці події. До сьогоднішнього дня такі типи тестів, як FIT та PnT, розглядалися як цілком окремі типи тестування. Тому, вирішення завдання з визначення точок їхнього «перетину» надають можливості перехресного використання результатів їхнього проведення, що у свою чергу, дозволить скоротити час та інвестиції, необхідні для виконання оцінки кібербезпеки та функційної безпечності PLC.

**Мета та структура роботи.** Метою статті є визначення кількості тестів із засівом дефектів, результати яких можуть бути використанні у якості виконання тестів на проникнення.

Основний матеріал статті наведений у 2-у та 3-у розділах, а висновки у розділі 4. У розділі 2 пропонується методика FIT, результати виконання якої під час оцінювання функційної безпечності одночасно можуть бути використані і у якості результатів виконання PnT, під час оцінювання кібербезпеки. У розділі 3 надаються практичні приклади використання запропонованої методики для оцінки кібербезпеки PLC.

### **Методологія оцінювання кібербезпеки за результатами оцінювання функційної безпечності**

**Визначення об'єкту дослідження.** Ядром будь-якої цифрової ІКС, пов'язаної з безпекою – є PLC, який може бути побудований на основі мікроконтролера чи FPGA. Саме PLC стає об'єктом кібератак зловмисників [7, 21].

PLC складається з апаратної (HW) та програмної (SW) частин. Програмна частина поділяється на платформну (system software) та алгоритмічну (application software) складові [14].

У рамках статті об'єктом досліджень є апаратна частина PLC, на базі FPGA, який розробляється у відповідності до вимог стандарту IEC 61508 і відповідає рівню функційної безпечності SIL-3. Як правило, PLC такого типу використовуються в ІКС, які виконують функції безпеки [23]. За кордоном, такі системи називають «safety» [24], тому надалі обраний об'єкт дослідження для простоти використання пропонується називати SPLC.

Розглянемо особливості SPLC. Вони не мають інтерфейсів із зовнішніми комп'ютерними мережами, та в них не використовуються програмні продукти третіх сторін. SPLC складаються із окремих (програмно-апаратних) модулів отримання сигналів від польових сенсорів, модуля або модулів реалізації прикладних алгоритмів керування, модулів виходу для передачі електричних команд та комунікаційних модулів для з'єднання з іншим SPLC. Усі модулі розміщуються у спеціально призначеному для цього

шасі. Обмін інформацією між модулями одного SPLC відбувається за рахунок внутрішніх комунікаційних ліній. Якщо у склад ІКС входить робоче місце оператора та додатковий сервер для зберігання і відображення поточної технологічної інформації, то використовуються односпрямовані інтерфейси або апаратні інформаційні діоди (data diode). Процес зміни уставок відбувається тільки при відключенні ІКС від операційної технологічної діяльності та з використанням спеціального програмного забезпечення [15, 17].

Апаратна частина SPLC може стати об'єктом таких кібератак, як: порушення конфігурації SPLC (зміна кількості та типу модулів у шасі); інсталяція невалідного модуля у шасі; атака на файл конфігурації FPGA; атака на внутрішні інтерфейси; атака на зовнішні інтерфейси; «soft faults» кристалу FPGA, які дорівнюють атаці на системну логіку, яка виконується у даний час.

**Аспект кібербезпеки у контексті FIT.** Для оцінки функційної безпечності SPLC використовуються стандартизовані і відпрацьовані методи FMEDA (Failure Modes and Effects Diagnostics Analysis) & FIT – ці методи зосереджені на оцінюванні ризиків відмов (критичних та некритичних), обумовлених фізичними дефектами апаратних засобів (випадкові одинокі відмови) є достатнім, якщо неможливі кібератаки або інші втручання в систему [15, 17].

Але, якщо такі атаки можливі, необхідно виконувати оцінювання кібербезпеки. Для оцінювання кібербезпеки використовуються аналоги FMEDA & FIT, а саме IMECA (Intrusion Modes and Effects Criticality Analysis) & PnT, сутність яких полягає в тому, що аналізується ланцюг «загроза-вразливість-атака-наслідки-критичність» для кібербезпеки.

Таким чином, маємо два операційних комплекси (процедури) оцінювання Proc FS = {FMEDA, FIT} – функційної безпечності і Proc CS = {IMECA, PnT} – кібербезпеки, які зазвичай, розглядаються, як незалежні. Отже, часові і економічні витрати в такому випадку є сумою часових і економічних витрат двох процедур: Proc FS та Proc CS.

На основі вищевикладеного сформулюємо гіпотезу про те, що при виконанні Proc FS = {FMEDA, FIT} можлива ситуація, коли окремі визначенні дефекти і відповідні їм FIT, можуть бути використані для аналізу кібербезпеки (повторювати результати операцій процедури Proc CS). Також, може бути сформульована симетрична друга гіпотеза – при виконанні Proc CS можлива ситуація, коли окремі результати виконаних операцій аналізу вразливостей та PnT можуть бути використані для аналізу функційної безпечності (повторювати за результатами операцій процедури Proc FS). Тобто апаратний дефект і є апаратною вразливістю, та навпаки.

**Визначення відносної потужності множини PnT на множини FIT.** Для визначення підмножини тестів PnT на підставі множини FIT, необхідно провести аналіз і відібрати ті, що повною мірою відповідають або еквівалентно імітують спробу зловмисника вплинути на роботу контролера. Це саме апаратні дефекти, які потенційно можуть бути використані

зловмисником для порушення конфіденційності, достовірності, цілісності або доступності інформації, як в середині, так із зовні SPLC (рис. 1, де, F – множина дефектів за результатами FMEDA, які мають бути перевірені під час FIT, у відповідності до обраного рівня SIL; I – множина вразливостей за результатами IMECA, які мають бути перевірені під час PnT).

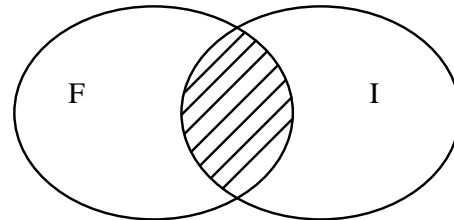


Рис. 1. Схематичне зображення області вразливостей на множині апаратних дефектів

Введемо наступну метрику перетину, за проявом вразливостей і дефектів,

$$\alpha = \text{Card}(F \cap I) / \text{Card} F,$$

яка визначає, яку частину апаратних дефектів за результатами FMEDA можна вважати одночасно і кібервразливістю.

У наступному розділі розглянемо приклади, які засвідчать практичну застосовність гіпотези, яка було сформульована у цьому розділі.

### Практичне застосування та висновки

Однією з найважливіших вимог до SPLC є його повністю детермінована поведінка. Тобто, він повинен очікувано переходити з одного дозволеного стану в інший, у разі настання одинокі апаратної випадкової відмови. Переходи між станами також мають бути чітко детерміновані. З точки зору кібербезпеки, SPLC має поводитися відповідно до стратегій зниження негативного впливу (mitigation strategy) під час кібератаки, через його апаратну вразливість. Таким чином, неважливо, що буде причиною відмови, але поведінка SPLC має бути строго детермінована.

У разі виникнення критичної апаратної відмови SPLC, у відповідності до [14], має переходити в «безпечний стан», який визначається технічним завданням і може бути або de-energize-to-trip, або energize-to-trip. При виникненні некритичної відмови SPLC має її діагностувати (детектувати) та супроводжувати оповіщенням [14, 15, 17].

Розглянемо практичний приклад, коли дефекти взяті з FMEDA, і побудовані на їхній основі тести для FIT, можуть бути використані під час виконання оцінки кібербезпеки SPLC. Результати цього огляду представлені в табл. 1.

У колонці «FMEDA symptom» надано результати виконання FMEDA для SPLC. У стовпчику «The essential of symptom» надано опис суті симптому, тобто події, яку було оцінено в FMEDA. Кібератака, яка відповідає опису суті симптому, представлена в колонці «The corresponding cyber-attack», а в колонці «Expected results/Mitigation strategy» записаний очікуваний результат поведінки SPLC і стратегія пом'якшення негативних наслідків у разі кібератаки.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз апаратних відмов і кібератак

#	FMEDA symptom	The essential of symptom	The corresponding cyber attack	Expected results/ Mitigation strategy
1	Loss of comm to each IOM	The physical corruption of internal communication lines between main module and I/O modules.	The malefactor tries to disrupt the internal communication link	Each SPLC modules detects it and the SPLC transits to the safe state due to severity level of fault
2	FPGA config memory soft fault	While the bitstream is being transferred from an external device into the FPGA the error occurs.	The malefactor tries to replace the correct firmware	The module detects it and not to transit in to normal operation mode
3	FPGA user RAM soft fault	The error occurs into the logic of FPGA algorithms.	The malefactor tries to implement the wrong path into the existing logic algorithm	The module detects it and transit in to safe state from the normal operation mode
4	No incompatible (non-safety or non-interfering) module is installed.	A module that is not related to the verified modules is being installed in SPLC.	The wrong module is installed to change the configuration of the SPLC	The main module detects it when wrong module replaces the correct module while the normal operation mode and transit entire SPLC in to safe state The main module detects it when wrong module replaces the correct module before operation starts and transit entire SPLC in the safe state immediately without normal operation mode.
5	Fault of external connected module occurs	The external connected module has the critical fault	The malefactor tries to break the external connected module from the another SPLC to change the configuration of entire I&C	The main module of SPLC detects it and make the annunciation about the detected fault and staying in the normal operation mode

Які висновки можна зробити при аналізі інформації в табл. 1: насамперед, постає питання про причину збігу очікуваних результатів при виконанні FIT і стратегії пом'якшення негативних наслідків кібератаки у разі виконання PnT. Очевидно, що причиною настання відмови, розглянутої в FMEDA, може бути, як одиничний випадковий апаратний дефект, так і навмисне втручання в роботу SPLC. Оскільки реакція SPLC на негативну подію з FMEDA має бути однаковою, незалежно від причини, що її викликала, відбувається збіг в останній колонці. Саме «Expected results» і «Mitigation strategy» якраз і розглядають поведінку (реакцію) SPLC на негативну подію.

Позначимо множину тестових кейсів засівання дефектів на основі FMEDA, як TCFIT, а її завдання у вигляді

$$TCFIT(n) = \{TCFIT(\sum_{i=1}^n i)\},$$

де  $n$  – кількість відмов із FMEDA, які мають бути протестовані; TCFIT( $i$ ) –  $i$ -й тест кейс засіву дефекту, для перевірки  $i$ -ої події із списку FMEDA.

Оскільки множина апаратних кібервразливостей  $TCPn(m)$  є підмножиною можливих одиничних апаратних дефектів, то кількість тестових кейсів виконання PnT є підмножиною тестових кейсів засівання дефектів TCFIT( $n$ ):

$$TCPn(m1) \subset TCFIT(n).$$

З іншого боку, множина  $TCPn(m1)$  є частиною множини тестових кейсів PnT по перевірці усіх можливих кібервразливостей (TCVIT ( $m$ )), які визначені за результатами ІМЕСА для апаратної і програмної частин SPLC, тому

$$TCPn(m1) \subset TCVIT(m).$$

На підставі цього, робимо висновок про те, що  $TCVIT(m) \cap TCFIT(n) \neq \emptyset$ .

Визначення кількості тестів, які одночасно задовольняють вимогам, як FIT, так і PnT, надаємо у наступному вигляді

$$TCPn = \{TCFIT(i) | Pn(TCFIT(i))\}, \quad (1)$$

де  $Pn(TCFIT(i))$  – властивість тестового кейсу TCFIT( $i$ ), з множини TCFIT, одночасно імітувати, і одиничний апаратний дефект і кібератаку.

На основі записаного вище правила (1), було виконано оцінку кількості тестових сценаріїв тестування на проникнення, на основі тестових сценаріїв засіву одиничних випадкових апаратних дефектів, для одного з модулів SPLC. Результати оцінювання наведено в табл. 2. Аналізуючи ці дані, робимо висновок, що кількість тестів на проникнення, у даному випадку, дорівнює 10 і, таким чином, обрана метрика буде дорівнювати  $\alpha = 10/38 = 0,263$ . Особливо цікавим є випадок із 36 і 37 тестовими сценаріями, які відповідають 10-му тестовому сценарію тестування на проникнення. Це свідчить про те, що одна кіберзагроза, а саме розрив зв'язку із зовнішнім SPLC може статися через різні апаратні дефекти (бути еквівалентною за наслідками). Висновок: У статті для обраного об'єкту дослідження, а саме апаратної частини SPLC на базі FPGA, який розробляється у відповідності до вимог ІЕС 61508, було сформульовано і доведено гіпотезу, що до можливості застосування результатів аналізу апаратних дефектів FMEDA та виконання FIT, у якості частини результатів аналізу вразливостей ІМЕСА та виконання PnT. На основі якої було розраховано кількість FIT, результати яких

можуть бути використанні у якості PnT, без їхньої окремої реалізації. З урахуванням того, що для виконання одного FIT в середньому витрачається від 24

людино/годин, то для 10 FIT часові витрати будуть дорівнювати 240 людино/годинам і це тільки для одного модуля, і тільки для апаратної частини.

Таблиця 2 – Визначення апаратних відмов, які одночасно є кібератаками

FIT/Pn		DX.XX.X/Module on 2018-02-26 / 7:58:27 from FMEDA3.wk3- LISTS OF FIT TESTS PER PHYSICAL MODULE	
$TC_{FIT}$	$TC_{Pn}$	Requirement/Solution Text	notes
1		[CM 5v low]	
2		[CM VCCA 2.5v lost]	
3		[CM VCCL 1.1v lost]	
4		[DELETED--CM VCCL 1.5v lost]	
5		[CM VCC 0.9v lost]	
6		[CM VCCIO 2.5v lost]	
7	1	[CM F-Optic fault]	In operating mode
8	2	[CM LVDS fault]	In operating mode/during installation
9	3	[CM RS232/485 corruption]	In operating mode
10		[CM clock A fault]	
11		[CM clock B fault]	
12		[CM clock C fault]	
13	4	[CM FPGA package failure]	during installation
14	5	[CM fpga config hard failure]	during installation
15	6	[CM fpga user logic gates ram hard faults]	during installation
16	7	[CM fpga config soft faults]	during installation
17	8	[CM fpga user ram soft faults]	during installation
18		[CM.PS 3.3v low]	
19		[CM.PS 3.3v high]	
20		[CM.PS 5v low]	
21		[CM.PS 5v high]	
22		[CM.PS VCCL 1.1V lost]	
23		[CM.PS VCCL 1.1V low]	
24		[CM.PS VCCL 1.1V high]	
25		[CM.PS VCCH 1.5V lost]	
26		[CM.PS VCCH 1.5V low]	
27		[CM.PS VCCH 1.5V high]	
28		[CM.PS VCC 0.9v lost]	
29		[CM.PS VCC 0.9v low]	
30		[CM.PS VCC 0.9v high]	
31		[CM.PS VCCIO 2.5v lost]	
32		[CM.PS VCCIO 2.5v low]	
33		[CM.PS VCCIO 2.5v high]	
34		[CM.PS clock B fault]	
35	9	[CM routing - corrupt CRC]	In operating mode
36	10	[CM.PS 3.3v lost *IT loss of comm'n sensed by {local MM} + {remote MM} + {remote CM}]	In operating mode
37	10	[CM.PS 5.0v lost *IT loss of comm'n sensed by {local LM} + {remote LM} + {remote OCM}]	In operating mode

Подальшими напрямками розвитку цієї тематики є визначення набору PnT, як апаратної частини SPLC, так і програмної. Таким чином, може з'явиться перспектива використання результатів, отриманих впродовж оцінювання функційної безпечності, для

аналізу або певної верифікації результатів оцінки кібербезпеки без проведення окремої процедури. Додатково планується провести оцінку фінансових та часових витрат, які можуть бути скорочені при використанні даного підходу в цілому.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. S. Coble ICS Vulnerabilities Increase 41% // Infosecurity Magazine, 18 august 2021. Available at: <https://www.infosecurity-magazine.com/news/ics-vulnerabilities-increase-41/>

2. <https://www.reuters.com/technology/colonial-pipeline-halts-all-pipeline-operations-after-cybersecurity-attack-2021-05-08/>
3. B. Maundrill Cyber-Attack on Australian Utility Firm Energy One Spreads to UK Systems // Infosecurity Magazine, 22 august 2023. Available at: <https://www.infosecurity-magazine.com/news/cyberattack-australian-utility/>
4. R. A. Coveney Energy executives expect more extreme cyber-attacks but defensive action is lagging, new DNV research reveals // DNV, 19 may 2022. Available at: <https://www.dnv.com/news/energy-executives-expect-more-extreme-cyber-attacks-but-defensive-action-is-lagging-new-dnv-research-reveals-224890>
5. International Electrotechnical Commission. (2010-11-10). IEC 62443:2010. Industrial communication networks. Network and system security – Part 1-4.
6. M. Tayag, M. Emmalyn Compromising systems: implementing hacking phases // International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT), Vol 11, N 2, p. 27-35, April 2019.
7. B. Mahar Penetration Testing Industrial Control Systems: What to Know // KROLL, 5 april 2022 Available at: <https://www.kroll.com/en/insights/publications/cyber/pentesting-industrial-control-systems>
8. Pentest-standard.org (2011), PTES Technical Guidelines - The Penetration Testing Execution Standard. Available at: [http://www.pentest-standard.org/index.php/PTES\\_Technical\\_Guidelines](http://www.pentest-standard.org/index.php/PTES_Technical_Guidelines)
9. А.І. Абакумов, В.С. Харченко «Тестування на проникнення систем інтернету речей: кіберзагрози, методи та аналізи» // Electronic Modeling, V. 44. № 4, с. 79-104, 2022.
10. International Standard ISO/IEC 27001:2013. Information technology – Security techniques – Information security management systems – Requirements
11. <https://ryanor.medium.com/hardware-trojans-under-a-microscope-bf542acbcc29>
12. Óscar Ruano, Francisco García-Herrero, Luis Alberto Aranda, Alfonso Sánchez-Macián, Laura Rodriguez and Juan Antonio Maestro Fault Injection Emulation for Systems in FPGAs: Tools, Techniques and Methodology, a Tutorial // <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1392>
13. В.А. Куланов, В.А. Куланов, А.С. Скрынник Инструментальное средство засева и моделирования константных неисправностей встроженных систем на ПЛИС // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи, № 7, с. 225-229, 2010 р.
14. International Electrotechnical Commission. IEC 61508:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety related systems – Part 1-7.
15. Федоров Ю. Н. Справочник инженера по АСУТП: проектирование и разработка. Учебно – практическое пособие // Инфа-Инженерия, 2-е изд., Том 1 - 2018, с. 448.
16. US NRC, NUREG/CR-7151: Development of a fault Injection-Based Dependability Assessment Methodology for Digital I&C System, Vol 1-4, 2011
17. Скляр В. В. Обеспечение безопасности АСУТП в соответствии с современными стандартами: Методическое пособие // Инфа-Инженерия, 2018, с. 384.
18. Харченко В. С. “Гарантоздатність комп'ютерних систем: межа універсальності у контексті інформаційно-технічних станів”, Радиоэлектронні і комп'ютерні системи, № 8, с. 7-14, 2007.
19. Харченко В. С. “Гарантоздатні системи та багатoversійні обчислення: аспекти еволюції”, Радиоэлектронні і комп'ютерні системи, № 7, с. 46-59, 2009.
20. V. Kharchenko V. Sklyar, A. Ivasuyk, “Fault-Injection Testing: FIT-Ability, Optimal Procedure and Tool for FPGA-Based Systems SIL Certification”// Proceedings of East-West Design&Test Symposium (EWDTS"2013). 2013. P.188-192.
21. V. Kharchenko V. Sklyar, A. Ivasuyk, O. Odarushenko “Fault insertion testing of FPGA-based NPP I&C systems: SIL certification issues”// Proceedings of 22nd International Conference on Nuclear Engineering, Technical Publication ICONE22. Nuclear Education, Public Acceptance and Related Issues; Instrumentation and Controls (I&C); Fusion Engineering; Beyond Design Basis Events. 2014. Vol. 6.
22. <https://commercial.allianz.com/news-and-insights/expert-risk-articles/cyber-attacks-on-critical-infrastructure.html>
23. СТАНДАРТ Державного підприємства «Національна Атомна Енергогенеруюча Компанія «ЕНЕРГОАТОМ» Інформаційні та керуючі системи, важливі для безпеки атомних електричних станцій загальні технічні вимоги – СОУ НАЕК 100:2022.
24. International Electrotechnical Commission. IEC 61513:2011 – Nuclear power plants - Instrumentation and control important to safety - General requirements for systems.

Received (Надійшла) 30.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.11.2023

### Using the FMEDA/FIT verification method to assess the cybersecurity of a programmatic logic controller

Oleksandr Ivasiuk, Vyacheslav Kharchenko

**Abstract.** Every year, the number of attacks on critical infrastructure, which plays a key role in human life, is growing. The main target of malefactor in this type of cyberattack is programmable logic controllers used to build I&CS. As a rule, this type of I&CS and programmable logic controllers have to meet the requirements of ensure functional safety, which is assessed by conducting FIT based on FMEDA. Additionally, to assess the cybersecurity level of a programmable logic controller, PnT based on IMECA is used. Hence, to assess the level of functional safety and cybersecurity, it is necessary to make double efforts. However, at the same time, significant time and financial investments should be taken into account to determine the degree of compliance with even one of them. Therefore, the task of substantiating the possibility of using the results already obtained regarding compliance with the requirements of functional safety to assess the level of cybersecurity of a programmable logic controller is relevant and of practical importance. The article discusses the issues of assessing the cybersecurity level of SPLCs based on FPGA technology. SPLCs meet the functional safety requirements of the SIL-3 level and they are the core of ICS developed to ensure the safety of critical technological processes. The possibility of using the results of FMEDA-based FIT for SPLC hardware as the results of IMECA-based PnT is substantiated. The metric chosen to assess the total number of hardware failures that can be considered as cyberattacks at the same time. The selected metric was used to evaluate the FMEDA results for one of the SPLC modules. The using of the proposed approach allows saving at least 240 labor/hours.

**Keywords:** functional safety, cybersecurity, hardware defect, cyber vulnerability.

С. Ф. Чалий, В. О. Лещинський

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНКИ ПОЯСНЕНЬ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ ІНФОРМАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ

**Анотація.** Предметом вивчення в статті є процеси побудови пояснень щодо процесів отримання рішення та отриманих результатів в інтелектуальній інформаційній системі. **Метою** розробка технології оцінки пояснень з урахуванням як чутливості цих пояснень до відмінностей у вхідних даних, так і можливостей використання пояснень користувачем згідно концепції використання рішення інтелектуальної системи. **Завдання:** структуризація задач побудови пояснень у аспекті оцінки тлумачень; структуризація показників оцінки пояснень з урахуванням залежностей між цими показниками; розробка послідовності етапів інформаційної технології комплексного оцінювання пояснень в інтелектуальній системі. Використовуваними **підходами** є методи побудови пояснень, методи та підходи до оцінки пояснень в системах штучного інтелекту. Отримані наступні **результати**. Виконано структуризацію задач побудови пояснень з урахуванням оцінки отриманих тлумачень. Виконано структуризацію показників оцінки пояснень з урахуванням обмежень доступу до процесу прийняття рішень в інтелектуальній системі. Показано, що в залежності від доступності даних про процес прийняття рішення в інтелектуальній системі доцільно використовувати показники точності або коректності. Показник чутливості дає можливість оцінити пояснення при категоризації знань щодо властивостей об'єктів або вхідних даних. Показник простоти визначає вплив кількості вхідних змінних на пояснення. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Запропоновано інформаційну технологію оцінки пояснень в інтелектуальній інформаційній системі. Технологія містить послідовність етапів із розрахунку показників чутливості, коректності та простоти пояснення, а також відбору підмножини пояснень за цими показниками з використанням взаємозалежностей між ними та можливості обмежень по показнику коректності. В практичному плані запропонована технологія створює умови для підбору пояснень за їх чутливістю та простотою для користувача з урахуванням особливостей вхідних даних та процесу використання рішення.

**Ключові слова:** інтелектуальна система, пояснення, процес прийняття рішення, причинно-наслідковий зв'язок, оцінка пояснень.

### Вступ

Пояснення в інтелектуальних системах дають можливість користувачеві переконатись у коректності отриманих рішень [1, 2], оскільки задають прості причинно-наслідкові залежності між вхідними даними та отриманим результатом [3].

Дослідження в сфері психології пізнання показують, що людина зазвичай має отримати обґрунтування нових знань. Такі обґрунтування часто надаються у формі пояснень [4- 6].

Актуальність і важливість використання пояснень пов'язана із широкими застосуванням в сучасних інтелектуальних системах алгоритмів машинного навчання. На результати роботи таких алгоритмів суттєво впливають упередженість та викиди в даних. Відповідно, отримані рішення можуть не відповідати потребам користувача, що на практиці приводить до неефективного використання результатів системи штучного інтелекту і, як наслідок, до матеріальних збитків. Інший аспект роботи інтелектуальних систем пов'язаний із юридичними обмеженнями, що не дозволяють розкривати алгоритми їх роботи кінцевому користувачеві. Такі обмеження знижують довіру користувача до пропозицій системи штучного інтелекту і, знову ж, обмежують використання цих рішень [7].

Напрямок розробки пояснень в інтелектуальних системах інтенсивно розвивається останні 15 років. В перших роботах головна увага приділялась визначенню показників задоволеності клієнтів рекомендаційних систем [8]. Однак обчислення таких показників є достатньо трудомістким, оскільки потребує проведення інтерв'ю із клієнтами.

Швидкий розвиток методів побудови пояснень відбувся в останні роки в рамках «Explainable Artificial intelligence», що була розроблена DARPA [9].

Однак існуючі підходи до оцінки пояснень орієнтовані в першу чергу на перевірку каузальних та темпоральних зв'язків між вхідними даними та результатом інтелектуальної системи [10-13]. Розробці комплексної технології, яка була б орієнтована на вибір простих пояснень з перевіркою їх коректності не приділялось достатньо уваги.

Зазначене свідчить про актуальність задачі розробки інформаційної технології оцінки пояснень.

**Метою статті** є розробка технології оцінки пояснень з урахуванням як чутливості цих пояснень до відмінностей у вхідних даних, так і можливостей використання пояснень користувачем згідно концепції використання рішення інтелектуальної системи.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі задачі:

- структуризація задач побудови пояснень у аспекті оцінки тлумачень;
- структуризація показників оцінки пояснень з урахуванням залежностей між цими показниками;
- розробка послідовності етапів інформаційної технології комплексного оцінювання пояснень в інтелектуальній системі.

### Показники оцінки пояснень в інтелектуальній системі

Задача оцінки пояснень вирішується в рамках комплексу задач побудови та застосування пояснень в інтелектуальних системах. Вона використовує в якості вхідних даних дані та результати задач



розуміння психології пояснень та розробки методів побудови пояснень. Загальна схема, що відображає зв'язок між цими задачами та передачею інформації для оцінки пояснень, представлена на рис. 1.

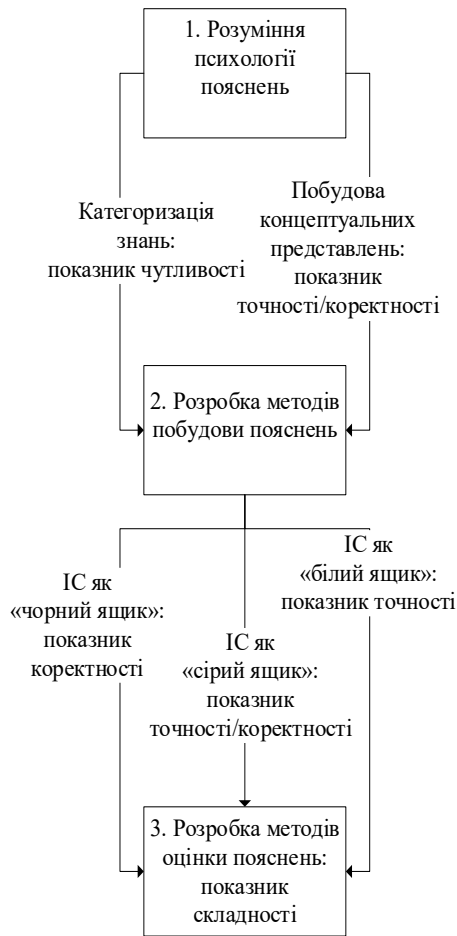


Рис. 1. Схема взаємодії задач формування та оцінки пояснень

Зальна послідовність формування пояснення передбачає виявлення психологічних характеристик користувача інтелектуальної системи. При вирішенні задачі розуміння психології пояснень використовуються теорії пізнання і формується відповідна ментальна модель, яка відображає процес пізнання людини [4-6]. Підтвердження виявлених закономірностей зазвичай реалізується через експерименти з навчанням дітей та наданням пояснень у процесі цього навчання.

Ментальна модель процесу пізнання дає можливість обґрунтувати такі аспекти пояснень в інтелектуальній інформаційній системі:

- набір показників, що використовується для оцінки пояснень;
- можливості та спосіб використання відомих властивостей вхідних даних для оцінки пояснень;
- узагальнену послідовність проведення оцінки пояснень в інтелектуальній інформаційній системі, яка враховувала б зв'язок між вибраними показниками та їх властивостями.

Виконаний аналіз психологічних теорій пояснення дає можливість зробити наступний висновок. Пояснення, яке буде зрозумілим для користувача

інтелектуальної системи, має відповідати двом альтернативним шляхам пізнання [6]:

– пізнання шляхом побудови концепцій щодо стану та динаміки предметної області, в якій відбувається навчання;

– пояснення на основі категоризації знань щодо властивостей об'єктів предметної області; такі властивості можуть бути статичними та динамічними.

В першому випадку пояснення має забезпечити узгодження знань користувача із рішенням інтелектуальної інформаційної системи.

Таке узгодження може виконуватись за бінарною та числовою оцінкою. Числова оцінка представлена точністю пояснень. Точність визначає відхилення залежностей у поясненні від залежностей, пов'язаних із процесом прийняття та використання рішення.

З позицій власника інтелектуальної системи, точність визначається через відхилення залежностей пояснення та процесу отримання результату.

З точки зору користувача точність має відображати відповідність пояснення способу використання рішення інтелектуальної системи. Останнє ж залежить від знань про предметну область. І проблема оцінки точності полягає в тому, що фонові знання людини містить неявну складову.

Загалом сукупність знань користувача інтелектуальної системи доцільно розділити на явні (explicit), неявні описові (implicit) і неявні поведінкові (tacit) знання (рис. 2).

Явні знання можуть бути безпосередньо відображені у вигляді причинно-наслідкових, темпоральних та аналогічних залежностей. Тому явні знання можуть бути безпосередньо використані для побудови пояснень і також для оцінки точності пояснень з точки зору користувача.

Неявні описові знання можуть бути використані двома способами.

По-перше, вони можуть бути трансформовані в явні методами традиційної інженерії знань. Така екстерналізація знань виконується у процесі бесіди інженера знань із експертами в предметній галузі і широко використовується, наприклад, при побудові баз знань в експертних системах.

По-друге, неявні описові знання можуть бути отримані в результаті аналізу логів (журналів подій) інтелектуальної інформаційної системи. Лог зазвичай містить множину послідовностей подій, яка відображає процеси, що відбувається в інформаційній системі, а також процеси взаємодії користувача з цією системою. Кожен процес складається із виконаної послідовності дій. І кожна така дія представлена подією логу. Відповідно, при багаторазовому виконанні процесу прийняття рішень в інтелектуальній системі лог містить записи про альтернативні процеси прийняття рішень. Порівняльний аналіз цих процесів дає можливість виявити неявні знання.

Неявні поведінкові знання зазвичай складаються з навичок виконання окремих дій чи послідовностей дій у процесах вирішення задач у предметній галузі. Ці знання не вербалізуються внаслідок їх практичної направленості і тому не можуть бути екстерналізовані традиційними методами інженерії знань.



**Рис. 2.** Екстерналізація (перетворення в явну форму) неявних знань для оцінки пояснень в інтелектуальній системі

Для їх вилучення використовуються лише результати моніторингу процесів в інтелектуальній системі, представлені у вигляді журналів подій. Таким чином, неявні знання обох видів можуть бути отримані на основі аналізу логів, отриманих в результаті моніторингу процесів в інтелектуальній системі та процесі взаємодії з користувачем. Однак останній вид процесів не завжди може бути представлений в логах, що створює проблему з використання числової оцінки пояснень. У такому випадку доцільно використати бінарну оцінку пояснень виду: коректне/некоректне тлумачення. Дана оцінка може бути отримана з використання пар (вхідні дані, результат).

Узагальнену порівняльну оцінку показників точності та коректності пояснень наведено у табл.1.

Таким чином, при побудові пояснень на основі формування концепцій щодо предметної області, в якій використовуються результати інтелектуальної системи, доцільно використовувати оцінку «коректне/некоректне пояснення». Остання визначає відповідність рішення вхідним даним згідно процесу функціонування інтелектуальної системи (з позиції власника системи) або ж відповідність результату, отриманого за визначених вхідних даних знанням користувача щодо способів використання результату у визначеній предметній області. У другому випадку, при побудові пояснення на основі категоризації знань щодо об'єктів предметної області, необхідно, щоб пояснення було схожим для об'єктів однієї категорії і відрізнялось для об'єктів іншої категорії. Властивості об'єктів в інтелектуальній інформаційній системі задаються через набори вхідних даних. Тому в якості оцінки пояснення доцільно використовувати чутливість тлумачення до властивостей об'єктів. Така чутливість відображає ступінь відмінності рішення системи в залежності від відмінності значень вхідних даних. Відхилення у значеннях вхідних даних можна задати або безпосередньо через відмінності значень цих даних, або через відмінності їх ваг [14].

**Таблиця 1 – Порівняльна оцінка властивостей та обмежень показників точності та коректності пояснень**

Показник	Властивості	Обмеження та сфера застосування
Точність	1) Числова оцінка; 2) З позицій власника інтелектуальної системи: відповідність/відхилення залежностей пояснення та процесу отримання результату; 3) З точки зору користувача: відповідність пояснення способу використання рішення інтелектуальної системи.	1) Має бути наявним журнал подій інтелектуальної системи, що відображають процес прийняття рішення; 2) Наявність логів (журналів подій) взаємодії з користувачем; 3) Застосування переважно при категоризації знань.
Коректність	1) Бінарна оцінка; 2) З позицій власника системи – відповідність пояснення парі (вхідні дані, результат); 3) З позицій користувача системи – відповідність пояснення концепції використання у предметній області.	1) Наявність вхідних даних та результату інтелектуальної системи; Застосування переважно при побудові концептуальних представлень у предметній області

Перша ситуація може бути використана при числових значеннях вхідних даних. Тоді ці значення нормуються, а чутливість  $S_j^{(i)}$  між  $Expl_i$  та  $Expl_j$  розраховується як відмінність співвідношень між різницею вхідних значень  $\Delta V$  та відповідних рішень  $\Delta R$  інтелектуальної системи за умови, що ці пояснення є близькими або співпадають:

$$S_j^{(i)} = \left| \frac{\Delta V_i \Delta R_j - \Delta V_j \Delta R_i}{\Delta R_i \Delta R_j} \right|, \quad \text{iff } Expl_i \approx Expl_j. \quad (1)$$

Якщо ж рішення співпадає в кількісному плані або є якісним чи бінарним (наприклад, погодження на виконання певної дії), то оцінка чутливості пояснення має вигляд:

$$S_j^{(i)} = |\Delta V_i - \Delta V_j| \text{ iff } Expl_i = Expl_j. \quad (2)$$

Вирази (1) та (2) важко використати у випадку, якщо вхідні дані є якісними, наприклад, мають перелічуваний тип. Тобто дані мають кінцевий набір значень із заданої множини. Такі вхідні дані досить часто зустрічаються, наприклад, в рекомендаційних системах. Зокрема, при виборі комп'ютера може відбуватись порівняння між процесорами i3, i5, i7, i9, тощо. В даному випадку доцільно враховувати вагу значень. Наприклад, значення змінної «процесор», що дорівнює «i7», може бути компромісним між продуктивністю та ціною і може мати більшу вагу. Значення цієї ж змінної «i9» або «i3» - меншу внаслідок більшої ціни або меншої потужності відповідно. Тоді оцінка чутливості пояснення в рекомендаційній системі виду «ми запропонували Вам дану модель ноутбука, тому що вона використовує модель процесора ...» базується на визначенні різниці ваг для пар значень змінних виду «i9» і «i7» або «i7» і «i3». Тобто

чим більше різниця у ціні або продуктивності, тим більшою має бути і чутливість пояснення.

З іншої сторони, при порівнянні процесорів з аналогічними можливостями від різних виробників чутливість має бути меншою для того, щоб пояснення відповідало потребам користувача.

Якщо для пояснення використовується декілька змінних, то ми маємо порівнювати їх сумарну вагу. За умови схожого результату оцінка чутливості пояснення має вигляд:

$$S_j^{(i)} = \left| \sum_i w_i - \sum_j w_j \right| \text{ iff } Expl_i = Expl_j. \quad (3)$$

Для того, щоб визначити межі чутливості, пропонується використовувати показник коректності. Тобто ми маємо досягти максимальної чутливості  $S_j^{(i)}$  за умови коректності пояснень  $C_i$  та  $C_j$ . Відповідно, задач побудови пояснень з використанням їх оцінки на основі показників чутливості та коректності має вигляд:

$$\max(S_j^{(i)}) | C_i, C_j = true. \quad (4)$$

Таким чином, при оцінці пояснення з урахуванням результатів вирішення задачі розуміння психо-

логії пояснень доцільно використовувати комбінацію оцінок коректності та чутливості.

Друга задача – побудова пояснення має суттєві обмеження на обчислювальну складність. Дослідження в рамках програми ХАІ показали, що користувач має витратити мінімум часу на розуміння пояснення. Інакше суттєво знижується ефективність використання результату роботи інтелектуальної системи. З урахуванням у загальному випадку відсутності повного доступу до процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі складність пропонується оцінювати за кількістю вхідних змінних, що використані для побудови пояснення. Головна ідея даної оцінки полягає в тому, щоб визначити ключові вхідні змінні, значення яких дають можливість побудувати пояснення. Тоді задача зниження складності пояснення базується на визначенні ваг вхідних змінних (на відміну від чутливості, де можуть використовуватись ваги значень змінних у випадку перелічуваного типу даних). Таким чином, задача оцінювання пояснень в інтелектуальній системі полягає у послідовному визначенні коректності, чутливості та складності пояснення. Зазначимо, що в даному випадку ми розглядаємо коректність, а не точність, оскільки перша оцінка може бути використана навіть у випадку представлення системи як «чорний ящик».

### Технологія оцінки пояснень

Послідовність етапів запропонованої інформаційної технології оцінки пояснень представлено на рис. 3.

При оцінці пояснень згідно запропонованої технології послідовно вирішується ряд підзадач, що враховують показники чутливості, коректності та простоти тлумачення.

1) Оцінка чутливості пояснень згідно виразів (1)-(3). Результатом даного етапу є множина можливих пояснень з різною чутливістю.

2) Оцінка коректності пояснення з урахуванням ваг значень вхідних змінних. Ваги значень вхідних даних можуть бути отримані такими способами: експертне оцінювання; статистична оцінка; машинне навчання.

Другий спосіб дає усереднене значення, а третій – забезпечує визначення ваг в залежності від категорії вхідних даних. Наприклад, визначення ваг конкретних моделей процесорів в рекомендаційній системі може бути отримано усередненням кількості покупок комп'ютерів з цими моделями процесорів. Однак при використанні машинного навчання ми можемо додатково коригувати ваги в залежності від регіону продаж, знань про користувача, тощо.

За результатами оцінки виконується відбір коректних пояснень згідно умови (4).

3) Оцінка складності пояснень виконується для множини коректних тлумачень, що були отримані в результаті виконання етапу 3.

4) Упорядкування пояснень виконується спочатку за оцінкою чутливості, а потім за оцінкою складності.

Такий підхід до упорядкування пов'язаний із тим, що більш чутливе (але коректне) пояснення відображає відмінності умов отримання рішення. В подальшому із пояснень зі схожою чутливістю можна вибрати більш просте.

### Висновки

Виконано структурування задач побудови пояснень та зав'язків між цими задачами у аспекті оцінки отриманих тлумачень. Структуровано показники оцінки пояснень. Показано, що в залежності від підходу до вирішення задачі психології пояснень для оцінки останніх можна використовувати показники точності/ коректності та чутливості.

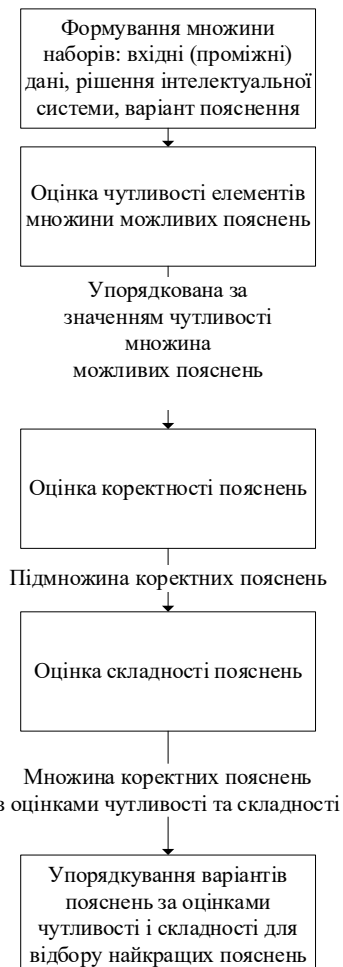


Рис. 3. Послідовність етапів технології оцінки пояснень з використанням показників чутливості, коректності та складності

Показник точності є числовим і визначає ступінь відповідності пояснення і отриманого в інтелектуальній системі рішення. Другий показник є бінарним і може бути використаним як обмеження у процесі оцінки пояснень. Показник точності пояснення потребує додаткової інформації щодо процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі. Тому його використання є обмеженим при представленні системи у вигляді чорного ящика. Показник чутливості задає оцінку пояснення через категоризацію знань щодо властивостей об'єктів. Показник простоти визначає вплив кількості вхідних змінних на пояснення. Використання даного показника

дає можливість спростити пояснення для користувача. Запропоновано інформаційну технологію оцінки пояснень в інтелектуальній системі. Дана технологія передбачає послідовний розрахунок показників чутливості, коректності та простоти пояснення, а також відбір підмножини пояснень за цими показниками з використанням показника коректності в якості обмеження. В практичному плані запропонована технологія створює умови для підбору пояснення з урахуванням особливостей вхідних даних та процесу використання рішення, що відображає потреби типового користувача інтелектуальної інформаційної системи.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Castelvechi D. (2016), "Can we open the black box of AI?" *Nature*, Vol. 538 (7623), pp. 20-23.
2. Adadi, A., Berrada, M. (2018) Peeking inside the black-box: a survey on explainable artificial intelligence (XAI). *IEEE Access* 6, 52138–52160.
3. Чалий С. Ф., Лещинський В. О., Лещинська І. О. (2021) Контрфактуальна темпоральна модель причинно-наслідкових зв'язків для побудови пояснень в інтелектуальних системах./ *Вісник НТУ "ХПІ"*. – Харків : НТУ "ХПІ", № 2 (6), С. 41-46.
4. Chi, M., de Leeuw, N., Chiu, M., & LaVancher, C. Eliciting self-explanations improves understanding. *Cognitive Science*. 1994. Vol.18. P. 439–477.
5. Carey, S. *The origin of concepts*. New York, NY: Oxford University Press. 2009. 608 p.
6. Чалий, С., and Лещинська, І. (2023). Концептуальна ментальна модель пояснення в системі штучного інтелекту. *Вісник НТУ «ХПІ»*. (1 (9), 70–75. <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2023.01.11>
7. Miller T. (2019), "Explanation in artificial intelligence: Insights from the social sciences", *Artificial Intelligence*, vol. 267, pp.1-38, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.artint.2018.07.007>
8. Tintarev N., Masthoff J. (2012), "Evaluating the effectiveness of explanations for recommender systems", *User Model User-Adap Inter.*, Vol. 22, pp. 399–439, <https://doi.org/10.1007/s11257-011-9117-5>.
9. Gunning i D. Aha, (2019) "DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program", *AI Magazine*, Vol. 40(2), pp.44-58, doi: 10.1609/aimag.v40i2.2850.
10. Oana-Maria Camburu, Eleonora Giunchiglia, Jakob Foerster, Thomas Lukasiewicz, Phil Blunsom. (2019) Can I trust the explainer? Verifying post-hoc explanatory methods. arXiv:1910.02065.
11. M. Yang and B. Kim (2019). BIM: Towards quantitative evaluation of interpretability methods with ground truth. arXiv:1907.09701
12. Chalyi, S., Leshchynskyi, V. (2020). Method of constructing explanations for recommender systems based on the temporal dynamics of user preferences. *EUREKA: Physics and Engineering*, 3, 43-50. doi: 10.21303/2461-4262.2020.001228.
13. Чалий С. Ф. Реляційно-темпоральна модель набору сутностей предметної області для процесу формування рішення в інтелектуальній інформаційній системі / С. Ф. Чалий, В. О. Лещинський, І. О. Лещинська // *Вісник НТУ "ХПІ. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології* – Харків : НТУ "ХПІ", 2022. – № 1 (7). – С. 84-89.
14. Chalyi, Sergii & Leshchynskyi, V.. (2023). Оцінка чутливості пояснень в інтелектуальній інформаційній системі. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2. 165-169. 10.26906/SUNZ.2023.2.165.

Received (Надійшла) 21.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.11.2023

**Information technology for evaluating explanations in an intelligent information system**

Serhii Chalyi, Volodymyr Leshchynskyi

**Abstract.** The article's subject matter is the process of constructing explanations regarding the decision-making process and the obtained results in the intellectual information system. The goal is to develop a technology for evaluating explanations, taking into account both the sensitivity of these explanations to differences in input data, and the possibility of using explanations by the user according to the concept of using an intelligent system solution. **Tasks:** structuring the tasks of constructing explanations in the aspect of evaluating interpretations; structuring of indicators of evaluation of explanations considering the dependencies between these indicators; development of a sequence of stages of information technology for comprehensive evaluation of explanations in an intelligent system. **The approaches** used are: methods of construction of explanations, methods and approaches to evaluation of explanations in artificial intelligence systems. The following **results** were obtained. The structuring of the tasks of constructing explanations taking into account the evaluation of the received interpretations was carried out. The structuring of the evaluation indicators of the explanations was carried out, taking into account the limitations of access to the decision-making process in the intelligent system. It is shown that, depending on the availability of data on the decision-making process in the intelligent system, it is advisable to use indicators of accuracy or correctness. The sensitivity indicator makes it possible to evaluate the explanation when categorizing knowledge about the properties of objects or input data. The simplicity index determines the effect of the number of input variables on the explanation. **Conclusions.** The scientific **novelty** of the obtained results is as follows. An information technology for evaluating explanations in an intelligent information system is proposed. The technology includes a sequence of stages for calculating indicators of sensitivity, correctness and simplicity of explanation, as well as selecting a subset of explanations based on these indicators using interdependencies between them and the possibility of restrictions on the indicator of correctness. In practical terms, the proposed technology creates conditions for the selection of explanations according to their sensitivity and simplicity for the user, taking into account the peculiarities of the input data and the process of using the solution.

**Keywords:** intellectual system, explanation, decision-making process, causal relationship, evaluation of explanations.

А. С. Янко<sup>1</sup>, В. А. Краснобаєв<sup>2</sup>, Р. О. Любченко<sup>1</sup>, П. С. Сабельнікова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний університет «Полтавська політехніка ім. Ю. Кондратюка», Полтава, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна

## ПРОЦЕДУРА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ МОДУЛЯРНОЇ АРИФМЕТИКИ

**Анотація.** У статті запропоновано до розгляду процес функціонування комп'ютерної системи (КС) у модулярній арифметиці (МА) на основі використання принципу відмовостійкості. Властивість відмовостійкості забезпечує можливість виконання заданих обчислювальних функцій після виникнення відмов, як за рахунок зниження в допустимих межах будь-яких показників якості функціонування, так і без погіршення показників якості функціонування КС. У статті розглядається режим відмовостійкості КС у МА, що реалізується методом заміни. Суть якого полягає в наступному, якщо резерв вичерпано (резервний обчислювальний тракт), тоді режим відмовостійкості КС у МА реалізується методом поступової деградації. КС у МА можна розглядати як мультимікропроцесорну обчислювальну систему з динамічним резервуванням та подальшою поступовою деградацією функціональних можливостей при виникненні відмов. Розроблено структуру функціонування відмовостійкої КС у МА.

**Ключові слова:** активна відмовостійкість, види резервування, комп'ютерна система, модулярна арифметика, обчислювальний тракт.

### Вступ

Прагнення підвищення функціональності пристроїв значно випереджає темпи розвитку та вдосконалення існуючих методів підвищення надійності. У такій ситуації єдиним ефективним засобом захисту від збоїв у роботі є побудова відмовостійких систем. На сьогоднішній день не існує комп'ютерної системи (КС), яка гарантує 100% стійкість до відмов. Іншими словами, не існує КС, яка гарантує 100% ймовірність безвідмовної роботи протягом заданого проміжку часу.

Існує два основних напрямки при побудові відмовостійких КС. Перший спосіб – використання лише стійких до відмов компонентів КС. При реалізації цього напрямку кожен компонент КС може продовжувати своє функціонування, навіть якщо один/кілька підкомпонентів КС виходять з ладу. Другий спосіб розробка методів, що гарантують побудову відмовостійкої КС з компонентів, що не є відмовостійкими. У таких системах відмовостійкість реалізована за рахунок запровадження надмірності та розробки спеціального програмного забезпечення, елементних взаємозв'язків та алгоритмів функціонування [2].

У статті розглядається процедура забезпечення відмовостійкого функціонування КС на основі використання особливостей модулярної арифметики (МА), застосування якої (як основної системи числення КС), дозволить створити і, надалі, дослідити варіанти моделей відмовостійкості КС на основі використання принципів активної (з перебудовою структури КС) або пасивної (без перебудови структури КС) відмовостійкості.

Визначимо поняття відмовостійкості КС в такий спосіб. Відмовостійкість комп'ютерної системи – це властивість архітектури КС, що забезпечує їй, як цифровій так логічній системі обробки даних, можливість безвідмовно функціонувати відповідно до виконуваної програми [1]. Невирішеність проблеми створення високовідмовостійких КС привела

багатьох дослідників до методів, заснованих на застосуванні кодів у МА. Значний внесок ще у 60-х роках у розвиток теорії та практики модулярного кодування та використання його для побудови високостійких та високонадійних КС внесли радянські вчені, але інтерес до цієї теми актуальний і на сьогодні, нині ведуться інтенсивні пошуки нових аспектів використання МА для підвищення відмовостійкості КС.

**Метою статті** є розробка відмовостійкої структури комп'ютерної системи на основі використання модулярної арифметики.

### Особливості кодової структури в МА

Виходячи з впливу основних особливостей МА (незалежність, рівноправність і малорозрядність, сукупність яких визначає модулярну кодову структуру) на структуру та принцип функціонування КС представимо його як обчислювальну систему, що складається з  $n$  інформаційних обчислювальних трактів (ІОТ) та одного резервного обчислювального тракту (РОТ) [3].

Кожен ІОТ має кінцеве число різних функціональних станів. Позначимо кінцеве число різних функціональних станів ІОТ за модулем  $m_i$  як  $\Upsilon_i = \{0, \overline{\gamma_i}\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

Якщо в поточний момент часу  $t$  ІОТ перебувають відповідно у станах  $s_1, s_2, \dots, s_n$ , тоді стан всіх ІОТ КС у МА можна характеризувати сукупністю значення станів  $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ . Множину станів РОТ КС позначимо як  $\Upsilon_k = \{1, \overline{n_k}\}$ .

У загальному випадку, процес функціонування КС у МА з урахуванням одного РОТ, можна описати за допомогою вектору станів:

$$S(t) = \{S_1(t), S_2(t), \dots, S_n(t), S'(t)\}, \quad (1)$$

де  $S_i(t)$  – стан ІОТ по модулю  $m_i$  в момент часу  $t \geq 0$ ;  $S'(t)$  – стан РОТ по модулю  $m_{n+1}$ .

У статті розглядається КС у МА, у якій всі обчислювальні тракти (ОТ) однаково надійні. Кількість ІОТ дорівнюватиме кількості  $n$  інформаційних модулів МА, а один ОТ перебуває у резерві ( $k = 1$ ). Таким чином, у цьому випадку режим відмовостійкості КС у МА реалізується методом заміни. Якщо резерв РОТ вичерпано, тоді режим відмовостійкості КС у МА реалізується методом поступової деградації. Як видно з результатів попередніх досліджень, КС у МА можна розглядати як мультимікропроцесорну (багатомашинну) обчислювальну систему з динамічним резервуванням та подальшою поступовою деградацією функціональних можливостей при виникненні відмов [4].

### Структура відмовостійкої КС у МА

У силу впливу вище згаданих особливостей МА на процес синтезу КС, структурне, інформаційне та функціональне резервування надають один на одного одночасний взаємний позитивний вплив. Наприклад, введення вторинної структурної надмірності (застосування структурного резервування), за допомогою додаткового використання РОТ до наявних  $n$  основних ІОТ, призводить до прояву як інформаційного, так і функціонального резервування. Інформаційне резервування пов'язане з інформаційною надмірністю, обумовленою наявністю надлишкових кодових слів, реалізованої шляхом використання додаткової інформації, одержуваної з виходів  $k$  РОТ. Щодо функціонального резервування зазначимо, що, відповідно до особливостей МА, один працездатний ОТ КС, що функціонує по модулю  $m_g$ , може взяти на себе обчислювальні функції до  $p$  обчислювальних трактів [5], що одночасно відмовили, при дотриманні умови:

$$m_g \geq \prod_{i=1}^p m_i. \quad (2)$$

На рис. 1 представлена спрощена структура відмовостійкої КС у МА (пристрій для одночасної реалізації структурного, інформаційного та функціонального резервування в МА). Даний пристрій для резервування МА містить інформаційні  $m_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) та контрольний  $m_{n+1}$  ОТ, блок контролю (БК), дешифратор (ДШ), логічні елементи І та АБО. Присутність сигналу на  $k$ -й вихідний БК відповідає відмові  $k$ -го ОТ  $m_k$  ( $k = \overline{1, n+1}$ ). Таким чином, з виходу БК на вхід дешифратора надходить  $n$ -розрядний двійковий код, що несе інформацію про працездатність робочих трактів  $m_1 \div m_n$  пристрою. Присутність одиниць на деяких позиціях цього коду відповідає відмови робочих трактів з номерами, що відповідають номерам позицій цих одиниць.

У табл. 1 наведено приклад утворення вихідного коду БК для МА, заданої інформаційними модулями  $m_1 = 3$ ,  $m_2 = 4$ ,  $m_3 = 5$ ,  $m_4 = 7$  та контрольним модулем  $m_5 = 23$ .

Таблиця 1 – Приклад утворення вихідного коду БК

Вихідний код БК				Номер ОТ, що відмовив	Співвідношення модулів МА	Працездатність пристрою
$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$			
0	0	0	0	-	-	+
0	0	0	1	4	$m_4 < m_5$	+
0	0	1	0	3	$m_3 < m_5$	+
0	0	1	1	3,4	$m_3 \cdot m_4 > m_5$	-
0	1	0	0	2	$m_2 < m_5$	+
0	1	0	1	2,4	$m_2 \cdot m_4 > m_5$	-
0	1	1	0	2,3	$m_2 \cdot m_3 < m_5$	+
0	1	1	1	2,3,4	$m_2 \cdot m_3 \cdot m_4 > m_5$	-
1	0	0	0	1	$m_1 < m_5$	+
1	0	0	1	1,4	$m_1 \cdot m_4 < m_5$	+
1	0	1	0	1,3	$m_1 \cdot m_3 < m_5$	+
1	0	1	1	1,3,4	$m_1 \cdot m_3 \cdot m_4 > m_5$	-
1	1	0	0	1,2	$m_1 \cdot m_2 < m_5$	+
1	1	0	1	1,2,4	$m_1 \cdot m_2 \cdot m_4 > m_5$	-
1	1	1	0	1,2,3	$m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 > m_5$	-
1	1	1	1	1÷4	$\prod_{i=1}^4 m_i > m_5$	-

Розглянемо роботу цього пристрою.

1. Усі основні тракти  $m_1 \div m_4$  працездатні. У цьому випадку з виходу блоку контролю код 0000 надходить на вхід дешифратора ДШ, з виходу якого сигнал на нульовій шині через елемент АБО надходить на вихід «працездатно», що свідчить про те, що пристрій є працездатним.

2. Частина основних трактів непрацездатна.

2а) Припустимо, що відмовили тракти по модулям  $m_1$  та  $m_2$ . З виходу БК код 1100 надходить на вхід дешифратора ДШ, з виходу якого сигнал по дванадцятій вихідній шині ( $1100_2=12_{10}$ ) через елемент АБО надходить на вихід «Працездатно». Одночасно код 1100 відкриває перший і другий елементи (одиниці на першій і другій позиціях коду 1100) і сигнал шини «Управління» через перший і другий елементи АБО надходить на керуючі входи «Зупинка» відповідно першого  $m_1$  і другого  $m_2$  трактів пристрою, а також через елемент АБО надходить на керуючий вхід «Пуск» контрольного тракту  $m_5$ . Таким чином, пристрій працездатний та інформація обробляється блоками  $m_3 \div m_5$  (тракти  $m_1$  і  $m_2$ , відключені);

2б) Припустимо, що відмовили тракти по модулі  $m_3$  і  $m_4$ . З виходу БК код 0011 надходить на вхід дешифратора. З виходу дешифратора сигнал третьої вихідної шини ( $0011_2=3_{10}$ ) через елементи АБО надходить на входи «Зупинка» трактів  $m_1 \div m_5$  ( $m_3 \cdot m_4 = 35 > m_5 = 23$ ). В цьому випадку пристрій непрацездатний і сигнал шини «Працездатно» відсутній.

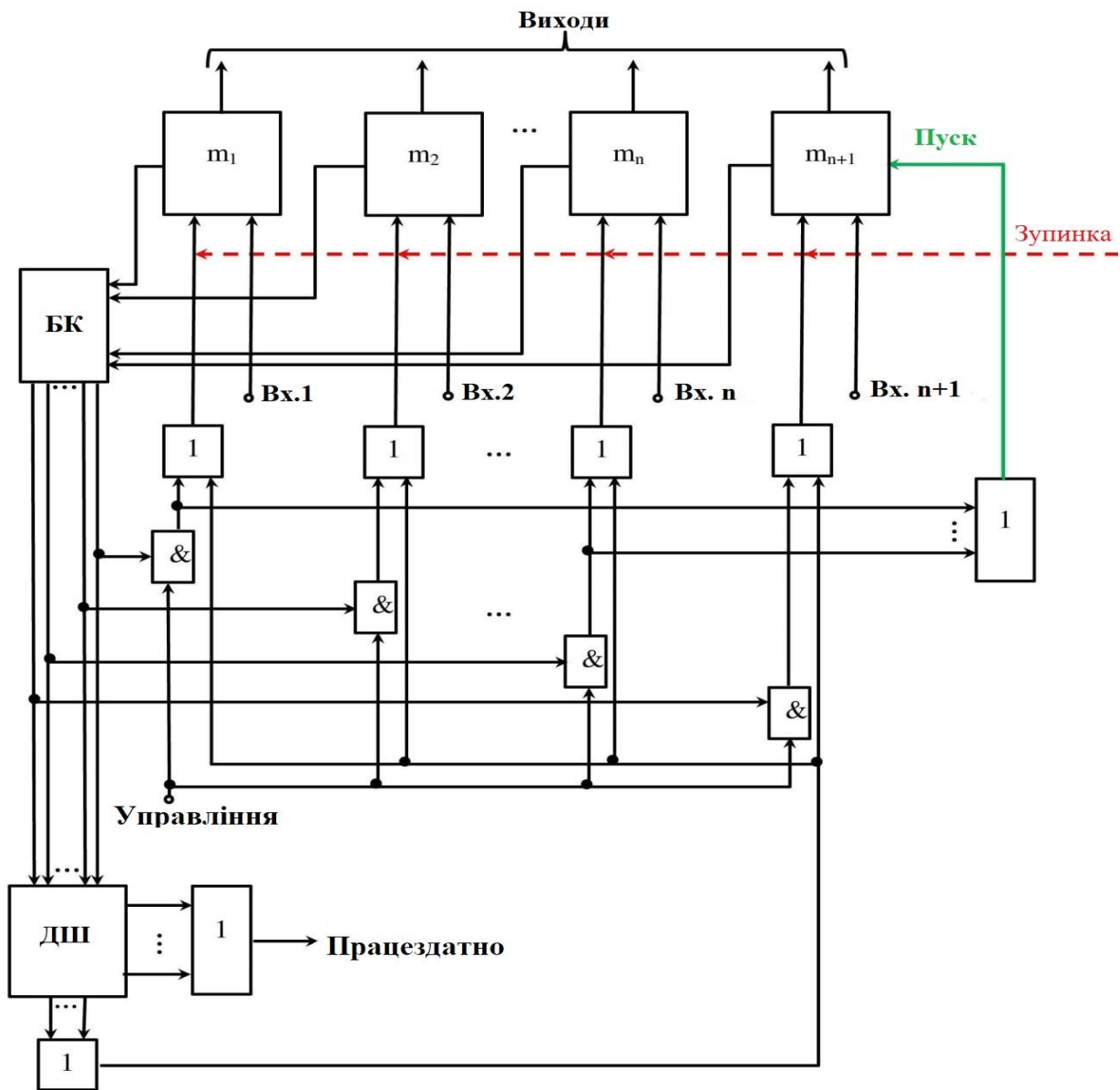


Рис. 1. Структура відмовостійкої КС у МА

Особливість функціонування цього пристрою полягає у розширенні функціональних можливостей за рахунок заміни одним справним контрольним трактом не одного, а одночасно кількох непрацездатних робочих трактів при виконанні умови (2). Це дозволяє істотно підвищити стійкість до відмови обчислювальних структур за рахунок можливості одночасного використання трьох видів резервування:

структурного (за рахунок введення контрольного обчислювального тракту по модулю  $m_n$  що паралельно функціонує з основними обчислювальними трактами),

інформаційного (за рахунок використання додаткової вихідної інформації контрольного обчислювального тракту, що забезпечує можливість корекції спотвореної інформації),

функціонального резервування за рахунок виконання умови (2).

Наведений приклад показує, що МА, на відміну двійкової позиційної системи числення, введена

додаткова надмірність максимально повно використовується поліпшення характеристик КС [6].

Дійсно, використання будь-якого виду резервування в кінцевому підсумку призводить до структурної (апаратної) надмірності, яка в МА (на відміну від двійкової позиційної системи числення) використовується для організації одночасно декількох різних видів резервування, що підвищує коефіцієнт використання надлишкового і загального сумарного обладнання КС, що вводиться.

### Висновки

У статті проведено дослідження процесу функціонування КС у модулярній арифметиці на основі використання принципу відмовостійкості.

У модулярній арифметиці відмовостійкість КС забезпечується за рахунок урахування основних властивостей даної модулярної системи числення, а саме:

- незалежність,
- рівноправність,
- малорозрядність,

сукупність яких формує модулярну кодову структуру.

З метою зручності та наочності проведення дослідження процесу функціонування комп'ютерної системи у модулярній арифметиці, у статті введено  $n$ -розрядний двійковий код, який відображає сукупність ознак працездатного стану обчислювальних трактів КС.

За допомогою цього коду проведено аналіз різних режимів відмовостійкості КС у модулярній арифметиці.

Таким чином, у цьому випадку режим відмовостійкості КС у МА реалізується методом заміни. Якщо резерв обчислювальних трактів вичерпано, тоді режим відмовостійкості КС у МА реалізується методом поступової деградації.

Як видно з результатів попередніх досліджень, КС у модулярній арифметиці можна розглядати як мультимікропроцесорну (багатомашинну) обчислювальну систему з динамічним резервуванням та по-

дальшою поступовою деградацією функціональних можливостей при виникненні відмов.

Наведено приклади відмовостійкості КС для конкретної сукупності модулів МА.

Порівняльний аналіз проведених у статті результатів досліджень показав наступне:

при відмовостійкому функціонуванні в режимах заміни або заміни з наступною поступовою деградацією, КС у модулярній арифметиці ефективніше, ніж аналогічна КС у двійковій позиційній системі числення.

Використання МА як система числення, дозволяє створити структуру КС, подібну до структури резервованої обчислювальної системи у двійковій позиційній системі числення. Ця обставина, поряд з іншими позитивними аспектами використання модулярного кодування, зумовленими впливом основних особливостей МА на структуру та принципи функціонування КС, дозволяє вважати МА потужним інструментом підвищення відмовостійкості.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Avresky D. R., Geoghegan S. J., Varoglu Y. Evaluation of Software-Implemented Fault-Tolerance (SIFT) Approach in Gracefully Degradable Multi-Computer Systems. *IEEE Transactions on Reliability*, Volume 55, Issue: 3, September 2006, pp. 451-457. doi: 10.1109/TR.2006.879663.
2. Wang T., Liu H., Sun M., Liu Z., Zhou M. Fault tolerance on improved distributed spanning tree structure. 2nd International Conference on Advanced Computer Control, Shenyang, 2010, pp. 296-300. doi: 10.1109/ICACC.2010.5487249.
3. Krasnobayev V., Kuznetsov A., Yanko A., Koshman S., Zamula A. and Kuznetsova T. Data processing in the system of residual classes. Monograph. ASC Academic Publishing, 2019, 208 p. ISBN: 978-0-9989826-6-3, ISBN: 978-0-9989826-7-0 (Ebook).
4. Raphaël M., Raison B. A probabilistic fault localization method for distribution networks using fault indicators. 2013 IEEE Grenoble Conference, Grenoble, 2013, pp. 1-6. doi: 10.1109/PTC.2013.6652237.
5. Krasnobaev V., Kuznetsov A., Kiian A., Kuznetsova K. Fault Tolerance Computer System Structures Functioning in Residue Classes. Proceedings of 2021 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Cracow, 2021, pp. 471-474. doi: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660919.
6. Geng Z., Han M., Bao W., Xie W. New Submodule Topology Based Fault Tolerance for Modular Multilevel Converters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2023. pp 1-12. doi: 10.1109/TPWRD.2023.3237891.

Received (Надійшла) 28.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.11.2023

### The procedure for ensuring fault tolerance of a computer system based on the use of modular arithmetic

A. Yanko, V. Krasnobayev, R. Liubchenko, P. Sabelnikova

**Abstract.** The article proposes for consideration the process of functioning of a computer system (CS) in modular arithmetic (MA) based on the use of the principle of fault tolerance. In MA, the fault tolerance of the CS is ensured by taking into account the main properties of this modular numbering system, namely: independence, equality and low-bitness, the totality of which forms a modular code structure. In order to facilitate and visualize the study of the functioning of the computer system in the MA, the article introduces an  $n$ -bit binary code that reflects the set of signs of the operational state of the computing tracts of the CS. With the help of this code, an analysis of various modes of fault tolerance of CS in MA was carried out. The fault-tolerance property provides the possibility of performing specified computing functions after the occurrence of failures, both due to a decrease in the permissible limits of any indicators of the quality of functioning, and without deterioration of the indicators of the quality of the functioning of the CS. The article considers the mode of fault tolerance of CS in MA, which is implemented by the method of replacement. The essence of which is as follows, if the reserve is exhausted (reserve computing path), then the failure-tolerance mode of the CS in the MA is implemented by the method of gradual degradation. CS in MA can be considered as a multi-microprocessor computing system with dynamic redundancy and subsequent gradual degradation of functionality in the event of failures. The structure of the functioning of the fault-tolerant CS in MA has been developed. Examples of CS fault tolerance for a specific set of MA modules are given. The comparative analysis of the research results carried out in the article showed the following: with fault-tolerant functioning in the modes of replacement or replacement with subsequent gradual degradation, the CS in MA is more effective than the similar CS in the binary positional numbering system. Using MA as a counting system allows you to create a CS structure similar to the structure of a reserved computing system in a binary positional numbering system. This circumstance, along with other positive aspects of the use of modular coding, caused by the influence of the main features of MA on the structure and principles of operation of the CS, allows to consider MA as a powerful tool for increasing fault tolerance.

**Keywords:** active fault tolerance, types of redundancy, computer system, modular arithmetic, computing tract.



Yulia Andrusenko, Tetiana Fesenko

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

## INSTABILITY OF CLOUD INFRASTRUCTURE RESOURCES AND SERVICES

**Abstract.** Increasing non-stationarity of cloud infrastructure resources and services leads to a significant decrease in its productivity. Therefore, **the purpose of the article** is to identify the reasons for non-stationarity of cloud infrastructure resources and services; finding ways to reduce the level of non-stationarity. As a result of the research, the following **results were obtained**. Sources leading to the specified non-stationarity are identified. Existing approaches to reducing non-stationarity are analyzed. An example of basic resource allocation using standard linear programming methods is given. Variants of application of these methods for dynamic redistribution of resources are shown. **Conclusion.** Allocation and dynamic redistribution of resources in the cloud infrastructure can be done using standard linear programming methods. But due to the significant non-stationarity of the cloud environment, the proposed approach will reduce the productivity of cloud resources. At the same time, with an increase in the number of variables and restrictions, the computational complexity of the proposed algorithm will grow exponentially. Therefore, it is necessary to look for other approaches for the distribution and redistribution of cloud resources in conditions of significant non-stationarity.

**Keywords:** cloud environment, cloud resources, non-stationarity, uncertainty, redistribution of resources.

### Introduction

Cloud computing is widely recognized by both practitioners and researchers as a reliable solution for storing and processing data for both commercial and scientific purposes. Although cloud computing has many advantages, not all problems with it have been fully solved, especially in the field of security, reliability, performance, etc. The vast majority of research in the field of planning assumes the availability of complete and reliable information about the problem, work, that is, a static deterministic execution environment. However, in cloud computing, services and resources are subject to significant non-stationarity when accessing and using resources. Volatility is a significant problem in cloud computing, creating additional challenges for end users, resource providers, and administrators. It is necessary to abandon the usual paradigms, adapt the existing models to the evolution of computing tools, and develop new strategies for planning and managing resources to effectively overcome non-stationarity. Uncertainty in user perception of qualities, intentions and actions of providers, privacy, security, availability, etc., among other aspects of cloud computing, are actively being researched [1–10]. However, their role in resource and service planning has not yet been adequately addressed.

**The purpose of the article** is to identify the reasons for non-stationarity of cloud infrastructure resources and services; finding ways to reduce the level of non-stationarity.

### 1. Sources of uncertainty

There are many sources of uncertainty. Table 1 describes some of them and briefly explains their planning implications. Among them: elasticity of work, dynamic change of characteristics, virtualization with a weak connection of applications with the infrastructure on which they are executed, variability of the time of provision of resources, inaccuracy of estimation of the time of execution of work, change of time of processing and transfer of data, time limits of processing, directive deadlines, change in real bandwidth and other phenomena. The workload can change dramatically. It

is difficult to accurately estimate the time of execution of works, to build models of its forecasting taking into account the history of calculations, to dynamically adjust the forecast, to correct errors in forecasts, etc. building [11, 12].

Actual performance can vary by sharing shared resources between different virtual machines. It is impossible to gain accurate knowledge about the system. Parameters such as the actual processor speed at which the virtual machine is processed, the number of available processors, or the actual bandwidth change over time. The principle of elasticity of cloud resources, when the user can change requests for resources, has a positive effect on the quality of service, but adds a new factor of uncertainty. Uncertainty can be in various components of computing and communication processes. The following knowledge is important: how specific dynamic computing and communication characteristics affect planning; how these characteristics can be used by the scheduler to reduce the impact of information incompleteness and achieve the desired QoS; how to effectively solve the relevant optimization problem; how to ensure scalable and reliable GRID behavior under constraints such as budget, QoS, SLA, energy cost, etc. Various stochastic, adaptive, reactive planning algorithms that do not require knowledge are studied, which are considered as effective alternatives to known technologies of deterministic optimization of the theory of schedules.

### 2. Approaches to reducing non-stationarity

Unspecified factors that can reduce the reliability and security of data, such as unexpected and unauthorized data modifications, hardware and software failures, disk errors, integrity violations or data loss, malicious intrusions, falsifications, denial of access for a long time, information leakage, conspiracy, etc., are considered in [13]. The authors propose a customizable, reliable, and secure distributed data storage scheme with an improved data detection and correction method, as well as their encoding/decoding speed. Technical failures, data breaches and collusion are difficult to predict.

Table 1 – Cloud infrastructure parameters and their main sources of uncertainty

	Data	Virtualization	Receipt of works	Migration	Energy consumption	Scalability	Availability of resources	Traffic elasticity	Elastic provision of resources	Time to provide resources
Real performance		+	+	+	+		+	+	+	+
Real bandwidth	+		+	+	+	+	+	+	+	+
Processing time		+			+		+	+	+	+
Available memory	+				+	+	+	+	+	+
Number of processors		+			+	+	+	+	+	+
Available storage space	+				+	+	+	+	+	+
Data transfer time	+								+	+
Resource potential		+	+			+		+	+	+
Network performance	+			+		+			+	+

This type of uncertainty is one of the main challenges when designing a reliable IT infrastructure. Modified Asmuth-B thresholds and weighted Mignotte secret sharing schemes are proposed to reduce encryption redundancy and damage caused by cloud collusion [14].

Technical failures, data breaches and collusion are difficult to predict. This type of uncertainty is one of the main challenges when designing a reliable IT infrastructure.

Most existing optimization solutions assume that the behavior of virtual machines and services is predictable and stable in operation. In real cloud infrastructures, these assumptions are not justified. Although most providers guarantee a certain processor speed, memory capacity, and amount of local storage for each dedicated virtual machine, the actual performance depends on the physical hardware used, as well as the use of shared resources by other virtual machines assigned to the same computer. This is also true for the communication infrastructure, where the actual bandwidth is very dynamic and difficult to guarantee.

The combination of virtualized computing resources, storage, software and services of dynamically scaling cloud environments adds a new dimension to the planning problem. The way services are provided depends not only on the properties and required resources, but also on other users who share the resources. Managing and optimizing cloud infrastructure is a complex task. Existing planning models do not accurately account for the uncertainty and dynamic performance changes inherent in heterogeneous and distributed infrastructures.

Two types of uncertainty can be distinguished: parametric and systemic. Parametric uncertainties arise as a result of incomplete knowledge and changes in parameters, for example, when data are imprecise, they are estimated using statistical methods and expressed as probabilities. Their analysis quantifies the impact of random input variables on optimization results. The efficiency and accuracy of probabilistic uncertainty

analysis is a matter of trade-off. This type of uncertainty is not reduced because it is a property of the system itself. Systemic uncertainty arises as a result of incomplete understanding of the processes that control service planning and can be reduced by obtaining more information. It is modeled using the theory of probabilities, the theory of evidence, the theory of possibilities, and fuzzy sets.

A robust design minimizes the impact of uncertainties on system performance and behavior. Traditionally, it was carried out using either a probabilistic approach or a worst-case analysis. Both approaches treat uncertainty either as random variables or as interval variables. In fact, uncertainty can be a combination of both.

Understanding and accounting for uncertainty should lead to improved resource planning efficiency. Most cloud applications require communication resources to exchange information between services, databases, or end users. However, providers may know the amount of data they will have to manage or the amount of computation required to perform the work.

One of the possible approaches to reducing non-stationarity is to allocate resources using standard methods. After that, with increasing non-stationarity, it is suggested to redistribute resources. Let's consider this approach using a simple example.

### 3. An example of a basic distribution of resources

Two streams of Big Data (stream  $A$ , traffic  $T_A$  terabytes per hour; stream  $B$ , traffic  $T_B$  terabytes per hour) are processed in the cloud environment. The corresponding cloud infrastructure has two critical resources during the current maintenance cycle. The first resource is dedicated RAM for storing the generalized results of data processing. The existing limitation is  $a_1$  Mb. The second resource is fast external memory for storing selected data for further use. The existing limitation is  $a_2$  GB.

On average, in one hour, the flows have the following characteristics:

stream  $A$  summarizes  $a_{1A}$  MB of information and selects for storage  $a_{2A}$  GB of data;

flow  $B$  summarizes  $a_{1B}$  MB of information and selects for storage  $a_{2B}$  GB of data.

We will consider the example on the following specific data:

traffic intensity of information flows:  $T_A=5$ ,  $T_B=4$  terabytes per hour;

the amount of allocated RAM: and  $r_1=24$  MB ;

the size of the allocated fast external memory: and  $r_2=6$  GB ;

intensity of receipt of generalized data reprocessing results :  $a_{1A}=6$  Mb /h.; and  $a_{1B}=4$  Mb /h;

the intensity of receiving the selected data:  $a_{2A}=1$  Gb /h.; and  $a_{2B}=2$  GB / hour.

In addition, during the current service cycle, the cloud infrastructure can process no more than 8 terabytes of stream  $B$ , that is, data processing takes no more than  $8/4=2$  (hours). Also, the duration of service of stream  $B$  cannot exceed the duration of service of stream  $A$  by more than 1 hour.

It is necessary to find the optimal time of the current service cycle, based on the requirement of the maximum possible total traffic received for processing from both streams.

First, it is necessary to carry out a mathematical formalization of this task. To do this, we will introduce the variables  $x_A$  and  $x_B$  - the duration of service of Big Data flows in the cloud environment (in hours).

Based on the verbal constraints described above, the system of task constraints can be formalized as follows:

$$x_A \cdot 6 + x_B \cdot 4 \leq 24; \tag{1}$$

$$x_A \cdot 1 + x_B \cdot 2 \leq 6; \tag{2}$$

$$x_B - x_A \leq 1; \tag{3}$$

$$x_B \leq 2. \tag{4}$$

In addition, there are implicit semantic restrictions (the value of the duration of maintenance of flows on a switching node cannot be negative):

$$x_A \geq 0; \tag{5}$$

$$x_B \geq 0. \tag{6}$$

The total volume of traffic for one processing cycle is equal to the sum of  $5x_A + 4x_B$ . Therefore, the objective function of the task will look like this:

$$y = 5x_A + 4x_B \rightarrow \max. \tag{7}$$

Therefore, the standard form of the linear programming problem is obtained (expressions (1) - (7)). For its solution, with a small number of constraints and variables, any existing methods can be used, for example, the simplex method.

For clarity, we will find the values of the required variables using the graphical method (we will use the presence of only two variables).

In the  $x_A$   $Ox_B$  coordinate system, we successively construct a polygon of permissible values (Figs. 1-3), based on the formalized constraints (1) - (6).

The points of the space of admissible solutions marked in Fig. 4 in blue, satisfy all restrictions at the same time. This space is limited by straight line segments that connect at the vertices of the resulting polygon.

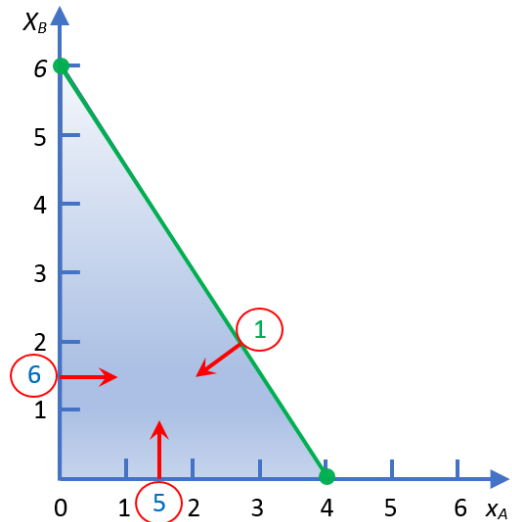


Fig. 1. Consideration of implicit restrictions and limitations (1)

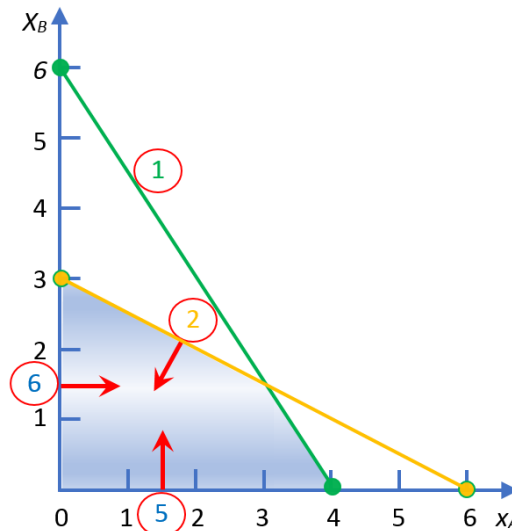


Fig. 2. Adding a restriction (2)

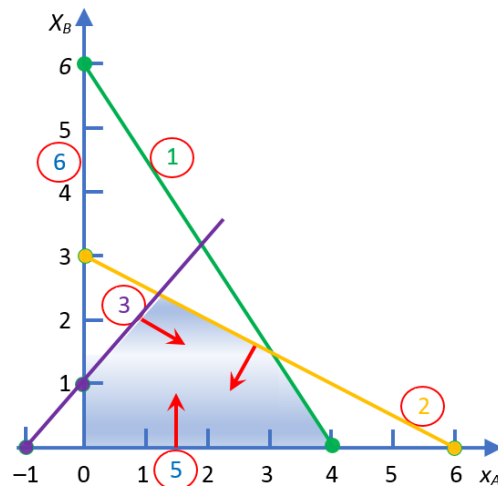


Fig. 3. Adding a restriction (3)

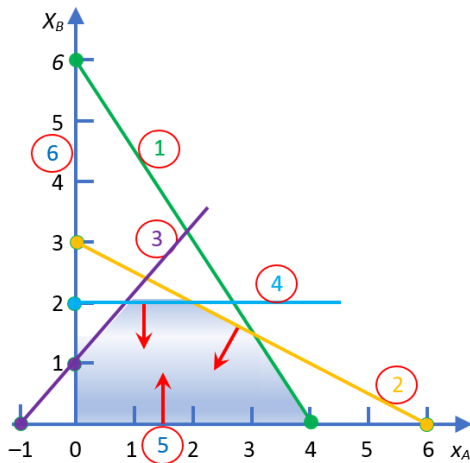


Fig. 4. Polygon of permissible values

Any point located inside or on the boundary of a given polygon is an admissible solution, that is, it satisfies all constraints. Since the feasible solution space contains an infinite number of points, some procedure for finding the optimal solution is required.

In order to find the optimal solution, it is necessary to determine the growth direction of the objective function (7) (since it should be maximized). We can equate  $z$  to several increasing values. These values, substituted instead of  $z$  in the expression of the objective function, generate the equations of straight lines (Fig. 5). The objective function can increase as long as the straight lines corresponding to the increasing values of this function cross the region of admissible solutions. The point of intersection of the area of admissible solutions and the line corresponding to the maximum possible value of the objective function will be the point of the optimum.

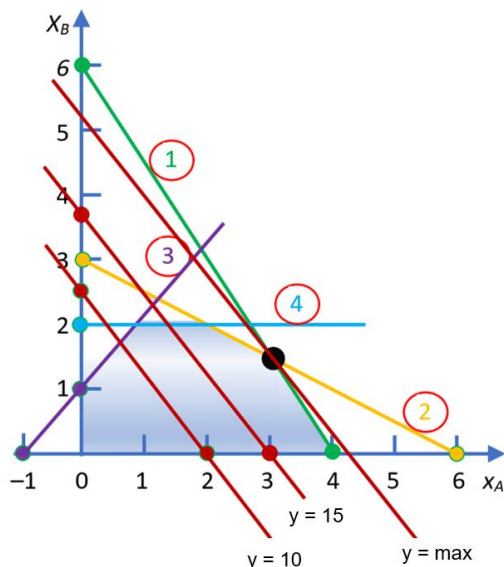


Fig. 5. Projection of the objective function

In fig. 5, it can be seen that the optimal solution corresponds to the point highlighted in black. This point is the intersection of straight lines (1) and (2), so its coordinates  $x_A$  and  $x_B$  are found as solutions to the system of equations defining these straight lines:

$$\begin{cases} 6x_A + 4x_B = 24; \\ x_A + 2x_B = 6. \end{cases}$$

The solution of this system will be  $x_A = 3$  and  $x_B = 1.5$ , while the value of the objective function is  $z = 21$ .

Therefore, the required time of the current service cycle will be three hours, while reprocessing will be performed for 21 terabytes of Big Data.

#### 4. Dynamic redistribution of resources

In the example of point 3, the result is obtained for unchanged task data. But in the process of processing, any changes may occur. Some restriction can be either strengthened or completely removed. Data acquisition rates may also change. Such situations can be resolved by varying the task statement.

For example, consider the option of removing restriction (4). As we can see in fig. 6, the result remained unchanged.

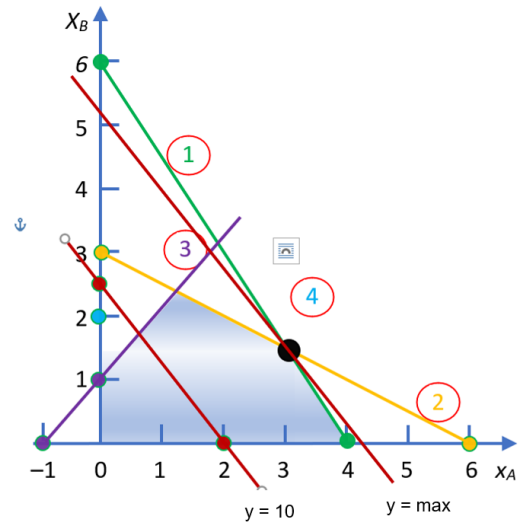


Fig. 6. Removal of restriction (6)

But removing a significant constraint or changing the objective function may change the result. This can be seen in Fig. 7, where restriction (1) is removed. As a result, it turned out to be expedient to rework only flow A, and the time of the current service cycle increases.

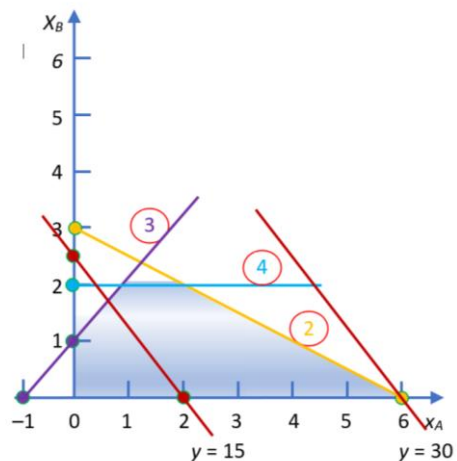


Fig. 7. Removal of restriction (1)

But it should be noted that due to the non-stationarity of cloud infrastructure resources and services, this step will have to be performed very often.

### Conclusion

Allocation and dynamic redistribution of resources in the cloud infrastructure can be done using standard linear programming methods. But due to the significant non-stationarity of the cloud environment,

the proposed approach will reduce the productivity of cloud resources. At the same time, with an increase in the number of variables and restrictions, the computational complexity of the proposed algorithm will grow exponentially.

Therefore, it is necessary to look for other approaches for the distribution and redistribution of cloud resources in conditions of significant non-stationarity.

### REFERENCES

1. Mezni, H., Aridhi, S. and Hadjali, A. (2018), "The uncertain cloud: State of the art and research challenges", *International Journal of Approximate Reasoning*, Vol. 103, pp. 139-151, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2018.09.009>.
2. Nawrocki, P., Grzywacz, M. and Sniezynski, B. (2021), "Adaptive resource planning for cloud-based services using machine learning", *Journal of Parallel and Distributed Computing*, Vol. 152, pp. 88-97, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2021.02.018>.
3. Saidi, K., Hioual, O. and Siam, A. (2020), "Resources Allocation in Cloud Computing: A Survey", *ICAIREs 2019: Smart Energy Empowerment in Smart and Resilient Cities*, pp 356-364, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37207-1\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37207-1_37).
4. Habiba, U., Masood, R., Shibli, M.A. and Niazi, M.A. (2014), "Cloud identity management security issues & solutions: a taxonomy", *Complex Adapt Syst Model*, Vol. 2, 5, doi: <https://doi.org/10.1186/s40294-014-0005-9>.
5. Kuchuk, N., Mozhaiev, O., Semenov, S., Haichenko, A., Kuchuk, H., Tiulieniev, S., Mozhaiev, M., Davydov, V., Brusakova, O. and Ghusov, Y. (2023), "Devising a method for balancing the load on a territorially distributed foggy environment", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(4) (121), pp. 48-55. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.274177>.
6. Chen, J., Wang, Y. and Liu, T. (2021), "A proactive resource allocation method based on adaptive prediction of resource requests in cloud computing", *J. Wireless Com Network*, 24, doi: <https://doi.org/10.1186/s13638-021-01912-8>.
7. Petrovska, I. and Kuchuk, H. (2022), "Static allocation method in a cloud environment with a service model IAAS", *Advanced Information Systems*, vol. 6, is. 3, pp. 99-106, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.3.13>.
8. Kuchuk, N., Shefer, O., Cherneva, G. and Alnaeri, F.A. (2021), "Determining the capacity of the self-healing network segment", *Advanced Information Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 114-119, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.16>.
9. Petrovska, I. and Kuchuk H. (2022), "Features of the distribution of computing resources in cloud systems", *Control, Navigation and Communication Systems*, No. 2, pp. 75-78, doi: <http://dx.doi.org/10.26906/SUNZ.2022.2.075>.
10. Kuchuk, G., Kovalenko, A., Komari, I.E., Svyrydov, A. and Kharchenko, V. (2019), "Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method", *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 171, Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kacprzyk, J. (Eds.), Springer Nature Switzerland AG, pp. 161-183, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8).
11. Nechausov, A., Mamusuć, I. and Kuchuk, N. (2017), "Synthesis of the air pollution level control system on the basis of hyperconvergent infrastructures", *Advanced Information Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 21-26, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.04>.
12. Tan, B., Ma, H. and Mei, Y. (2017), "A NSGA-II-based approach for service resource allocation in cloud", *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, 17013723, pp. 2574-2581, doi: <https://doi.org/10.1109/CEC.2017.7969618>.
13. Mohamed, Abdel-Basset, Laila, Abdel-Fatah and Arun Kumar Sangaiah. (2018), "Chapter 10 - Metaheuristic Algorithms: A Comprehensive Review", Editor(s): Arun Kumar Sangaiah, Michael Sheng, Zhiyong Zhang, *Intelligent Data-Centric Systems, Computational Intelligence for Multimedia Big Data on the Cloud with Engineering Applications*, Academic Press, 2018, Pages 185-231, ISBN 9780128133149, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813314-9.00010-4>.
14. Liu, Xi, and Dan Zhang. 2019. "An Improved SPEA2 Algorithm with Local Search for Multi-Objective Investment Decision-Making" *Applied Sciences* 9, no. 8: 1675. doi: <https://doi.org/10.3390/app9081675>.

Received (Надійшла) 18.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.11.2023

### Нестационарність ресурсів та послуг хмарної інфраструктури

Ю. О. Андрусенко, Т. Г. Фесенко

**Анотація.** Збільшення нестационарності ресурсів та послуг хмарної інфраструктури призводить до суттєвого зниження її продуктивності. Тому **метою статті** є визначення причин нестационарності ресурсів та послуг хмарної інфраструктури; знаходження шляхів зменшення рівня нестационарності. В результаті дослідження отримані такі **результати**. Визначені джерела, що призводять до вказаної нестационарності. Проаналізовані існуючі підходи до зменшення нестационарності. Наведений приклад базового розподілу ресурсів з використанням стандартних методів лінійного програмування. Показані варіанти застосування даних методів для динамічного перерозподілу ресурсів. **Висновок.** Розподіл та динамічний перерозподіл ресурсів у хмарній інфраструктурі можна провести з використанням стандартних методів лінійного програмування. Але за рахунок суттєвої нестационарності хмарного середовища запропонований підхід знизить продуктивність хмарних ресурсів. При цьому при збільшенні кількості змінних та обмежень обчислювальна складність запропонованого алгоритму буде зростати експоненційно. Отже, необхідно шукати інші підходи для розподілу та перерозподілу хмарних ресурсів в умовах суттєвої нестационарності.

**Ключові слова:** хмарне середовище, хмарні ресурси, нестационарність, невизначеність, перерозподіл ресурсів.

Nina Kuchuk, Anna Shyman

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

## SYNTHESIS OF A COMPUTER NETWORK FOR CONTROLLING MOVING OBJECTS

**Abstract.** Today, there are many methods of synthesis of the basic network of the computer control system. But they do not take into account the mobility of control objects. Therefore, the purpose of the article is to develop a method of synthesis of the basic network of the computer control system, which takes into account the mobility of control objects. The method is based on the use of the function of the average loss of messages in the network at the input load and the dynamic resource allocation plan. Regardless of the selected class of the basic network, the developed method assumes: the selection of an appropriate management efficiency assessment function; synthesis of control algorithms for restricting access to the network; synthesis of adaptive routing algorithms that ensure optimal distribution of flows on the short-circuit network. The direction of further research is to take into account the placement of base stations of the computer system.

**Keywords:** computer system, moving object, core network, optimization, synthesis, cloud computing, fog computing, packet switching, traffic.

### Introduction

The basic network of the computer system for managing moving objects should provide users with the following services [1]:

- transmission of information packets from system sensors in real time;
- transfer of packages of control stations and mainframes;
- exchange of information between nodes of the computer system;
- transmission of traffic of local nodes of the computer system;
- access to cloud systems;
- exchange of video images;
- transmission of protected traffic.

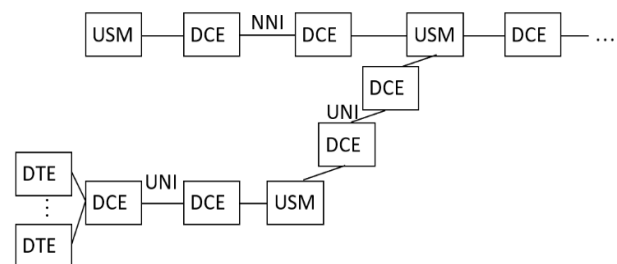
To provide the above services, the transit transport mechanism of global computing networks (GOM) is used, which is based on the three lower levels of the OSI network model. In parallel, with the growing popularity of the Internet, the share of services related to the upper levels of the protocol stack is growing: access to hypertext information WEB-nodes, broadcasting of video information, search and delivery of information according to individual orders, etc.

Today, there are many methods of synthesis of the basic network of the computer control system [2–11]. But they do not take into account the mobility of management objects.

Therefore, the purpose of this article is to develop a method of synthesis of the basic network of the computer control system, which takes into account the mobility of control objects.

### Research results

A fragment of the structure of a modern basic network of a computer system for managing moving objects, operating in packet switching mode (PC), is presented in Fig. 1, which shows the following blocks: USM - switching or routing devices; DCE - physical layer protocol support equipment; DTE - network terminal equipment; UNI - "user - network" interface; NNI - "network - network" interface.



**Fig. 1.** A fragment of the structure basic network

This option is optimal both from the point of view of the total traffic transmitted by the network per unit of time, and in terms of the cost of network services [2] (other things being equal, a packet-switched network is 2-3 times cheaper than a channel-switched network [3]). However, it is not always possible to build a basic network of a computer system for managing moving objects based on packet switching. Therefore, depending on the allocated communication channels, networks based on allocated channels are also considered. When building all of the listed types of networks, issues related to the improvement of adaptive network management methods, including management of information flows and communication channels, are particularly relevant.

Let's consider the construction of information flow management algorithms that take into account adaptive routing and a number of network constraints (load limitations, buffer memory capacity, and limited bandwidth of communication channels). Let's consider the network as a set of means of communication and switching and network management system. We define the network model as an undirected regular graph  $G(V, R)$ , where  $V$  is the set of nodes of the network, and  $R = \{r_{ij} \mid i, j \in V\}$  is the set of communication lines between them. Let us consider a stationary flow  $\Lambda = \{k_{ij}\}$  with a priori - unknown parameters on  $G$ . The load coming to the network will be distributed according to given static ( $P_{st}$ ) and dynamic ( $P_{dn}$ ) plans, and the routes of the  $P_{st}$  plan in any case have priority. The distribution plan of each node  $i$  ( $i \in V$ ) is defined by the

routing matrix  $S_i = (p_{ij}^j)$ ,  $j \in V$ , where  $p_{ij}^j$  is the conditional probability with which a call belonging to the plan  $P_{dn}$ , which arrived at the  $i$ -th node and is addressed to the  $j$ -th node, is directed to the node  $l \in V$  on the short circuit  $r_{il} \in R$ . With a given model of the network management system ( $M_{sum}$ ), the task of adaptive flow management is the selection of the optimal load distribution of the dynamic plan, which is provided for the given network structure, static plan, network load and functionality, which evaluates the effectiveness of the UE algorithms ( $F$ ), i.e.

$$F(G, \Lambda, P_{dn}, P_{st}, M_{CYM}) \xrightarrow{\Lambda, P_{dn}} extr.$$

In networks with channel switching, as always, one of the main components of the above functional  $F$  is the probability of successful connection establishment, and the management task is the maximum use of the network bandwidth when the input load changes within wide limits. At the same time, it is necessary to avoid unproductive network overloads associated with broadcast messages, repeated calls and unreasonably long routes. These tasks are solved by load limiting algorithms, which limit subscribers' access to the network, and adaptive routing algorithms [4], which limit the choice of outgoing directions.

When considering flows without priorities, it is advisable to use the function of the average loss of messages in the network [5] at the input load  $\Lambda$  and the dynamic distribution plan:

$$W = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \omega_{ij} = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \left( \Lambda_{ij}(\Pi_{dn}, \Pi_{st}) - (\lambda_{ij} + \lambda_{ji}) \right) \times p_{ij} \left( \Lambda_{ij}^{(e)}(\Pi_{dn}, \Pi_{st}) \right), \quad (1)$$

where  $\Lambda_{ij}$  is the intensity of the flow arriving according to the given plans to the communication channel  $r_{ij}$  from nodes  $i$  and  $j$ ;  $\Lambda_{ij}^{(e)}$  is the intensity of the repeated flow on the communication channel  $r_{ij}$ ;  $p_{ij} \left( \Lambda_{ij}^{(e)}(\Pi_{dn}, \Pi_{st}) \right)$  is probability of blocking path  $r_{ij}$  for flow  $\Lambda_{ij}^{(e)}$ .

For each of the components of the sum (1), the partial derivatives are equal

$$\frac{\partial \omega_{ij}}{\partial \Lambda_{ij}} = p_{ij} + \Lambda_{ij}^{(tr)} \cdot \frac{\partial p_{ij}}{\partial \Lambda_{ij}^{(e)}} \cdot \frac{\partial \Lambda_{ij}^{(e)}}{\partial \Lambda_{ij}}, \quad (2)$$

where  $\Lambda_{ij}^{(tr)} = \Lambda_{ij} - (\lambda_{ij} + \lambda_{ji})$

is the intensity of the flow of transit calls on  $r_{ij}$  arriving from nodes  $i$  and  $j$ .

The partial derivatives  $\frac{\partial p_{ij}}{\partial \Lambda_{ij}^{(e)}}$  of expression (2)

under the given conditions have an analytical expression [6]. To estimate their values, an empirical estimate is used, which is calculated on the basis of data on the change in flows  $\Lambda_{ij}$  and  $\Lambda_{ij}^{(e)}$  on the previous iteration, i.e.

$$\frac{\partial \Lambda_{ij}^{(e)}}{\partial \Lambda_{ij}} [n] \approx \frac{\Delta \Lambda_{ij}^{(e)} [n-1]}{\Delta \Lambda_{ij} [n-1]}.$$

When routing with priorities, the functional of the average value of the total value of the messages transmitted by the network is considered [7]:

$$\Phi = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \left( 1 - P_{ij}(\Lambda, P_{dn}, P_{st}) \right) \int_0^{c_{ij}} L_{ij}(u_{ij}) du_{ij}, \quad (3)$$

where  $P_{ij} \left( \Lambda^{(0)}, P_{dn}^{(0)}, P_{st}^{(0)} \right)$

is the probability of message transmission failure by communication channels  $r_{ij}$  with limited input load  $\Lambda^{(0)}$  and limited plans  $P_{dn}^{(0)}, P_{st}^{(0)}$ ;  $L_{ij}(u_{ij})$  is the limit function of the value of the messages of the flow passing through the communication channel  $r_{ij}$ , when exceeding which ( $\eta_{ij} > L_{ij}(u_{ij})$ ) the message transfer requests are accepted by the network for servicing;  $c_{ij}$  – limit limit for the flow through the communication channel  $r_{ij}$ ;  $u_{ij}$  is the value of the current flow through the communication channel  $r_{ij}$ .

So, in this case, it is necessary to choose such  $\Lambda^{(0)}, P_{dn}^{(0)}$  and  $P_{st}^{(0)}$ , at which the maximum of the functional (3) is ensured. At the same time, the synthesis of flow control algorithms can be divided into two stages. At the first stage, it is necessary to synthesize algorithms that ensure a minimum weighted average loss of messages  $\Lambda^{(0)}$ , i.e.

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} k(c_{ij}) \cdot \lambda_{ij} \cdot P_{ij} \left( \Lambda^{(0)}, P_{dn}^{(0)}, P_{st}^{(0)} \right) \rightarrow \min,$$

where  $k(c_{ij}) = \int_{L_{ij}(c_{ij})}^{\eta_{ij}^{(max)}} u_{ij} t_{ij}(u_{ij}) du_{ij}$

is the weighting factor determined in accordance with (3) and the average priority rating  $t_{ij}(u_{ij})$ .

At the second stage, algorithms are synthesized that provide the maximum total value.

A necessary condition of optimality is the equality of partial derivatives to zero  $\frac{\partial \Phi}{\partial c_{ij}}$ , i.e.

$$\begin{aligned} & L_{ij}(c_{ij}) \left( 1 - P_{ij} \left( \Lambda^{(0)}, P_{dn}^{(0)}, P_{st}^{(0)} \right) \right) - \\ & - \frac{\partial P_{ij} \left( \Lambda^{(0)}, P_{dn}^{(0)}, P_{st}^{(0)} \right)}{\partial c_{ij}} \int_0^{c_{ij}} L_{ij}(u_{ij}) du_{ij} = 0 \\ & L_{ij}(c_{ij}) = \frac{1}{1 - P_{ij} \left( \Lambda^{(0)}, P_{dn}^{(0)}, P_{st}^{(0)} \right)} - \\ & - \frac{\partial P_{ij} \left( \Lambda^{(0)}, P_{dn}^{(0)}, P_{st}^{(0)} \right)}{\partial c_{ij}} \cdot \int_0^{c_{ij}} L_{ij}(u_{ij}) du_{ij}. \end{aligned} \quad (4)$$

Since the functional (3) is concave [11], the expression (4) is also a sufficient condition for the optimality of the input load limitation. To implement (4) on  $G(V, R)$ , you can use iterative procedures that use positive increments of the value  $c_{ij}$ . According to the found values of  $c_{ij}[n]$  the required value of the threshold  $L_{ij}$  is determined for the priorities of messages arriving at the short circuit  $r_{ij}$ . When packet switching based on virtual channel switching is used in the network, when the transmission of the message is preceded by the organization of a virtual channel, it is possible to draw a complete analogy with channel switching [12] and therefore expressions (2) – (4) can be applied with some restrictions. When transmitting packets of the same message along different, independently chosen routes (for example, the datagram method), the main requirement for the network is transparency for subscribers. Therefore, message delays in the network must be minimal, and the capacity of the buffer memory

is chosen so that, on the one hand, it ensures the intermediate storage of packets transmitted in the network with low delays, and, on the other hand, the probability of overflow is sufficiently small. Algorithms for restricting access to the network and choosing the optimal route are built accordingly.

## Conclusions

The method of synthesis of the basic network of the computer control system, which takes into account the mobility of control objects, has been developed. Regardless of the selected class of the basic network, the method assumes: the selection of an appropriate management efficiency evaluation function; synthesis of control algorithms for restricting access to the network; synthesis of adaptive routing algorithms that ensure optimal distribution of flows on the short-circuit network. The direction of further research is taking into account the placement of base stations of the computer system.

## REFERENCES

1. Зиков І. С., Кучук Н. Г., Шматков С. І. Синтез архітектури комп'ютерної системи управління транзакціями e-learning. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 3. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.10>.
2. Кучук Г.А. Інформаційні технології управління інтегральними потоками даних в інформаційно-телекомунікаційних мережах систем критичного призначення : монографія / Г.А. Кучук. – Х.: ТОВ «Щедра садиба плюс», 2018. – 264 с. – ISBN 978-617-7188-18-5.
3. Ткачов В. М., Коваленко А. А., Кучук Г. А., Ні Я. С. Метод забезпечення живучості високомобільної комп'ютерної мережі. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Том 5, № 2. С. 159-165. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.22>
4. Saidi, K., Hiuual, O. and Siam, A. (2020), "Resources Allocation in Cloud Computing: A Survey", *ICAIREs 2019: Smart Energy Empowerment in Smart and Resilient Cities*", pp 356–364, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37207-1\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37207-1_37).
5. Habiba, U., Masood, R., Shibli, M.A. and Niazi, M.A. (2014), "Cloud identity management security issues & solutions: a taxonomy", *Complex Adapt Syst Model*, Vol. 2, 5, doi: <https://doi.org/10.1186/s40294-014-0005-9>.
6. Kuchuk, N., Mozhaiev, O., Semenov, S., Haichenko, A., Kuchuk, H., Tiulieniev, S., Mozhaiev, M., Davydov, V., Brusakova, O. and Gnusov, Y. (2023), "Devising a method for balancing the load on a territorially distributed foggy environment", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(4 (121)), pp. 48–55. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.274177>.
7. Chen, J., Wang, Y. and Liu, T. (2021), "A proactive resource allocation method based on adaptive prediction of resource requests in cloud computing", *J. Wireless Com Network*, 24, doi: <https://doi.org/10.1186/s13638-021-01912-8>.
8. Petrovska, I. and Kuchuk, H. (2022), "Static allocation method in a cloud environment with a service model IAAS", *Advanced Information Systems*, vol. 6, is. 3, pp. 99–106, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.3.13>.
9. Kuchuk, N., Shefer, O., Cherneva, G. and Alnaeri, F.A. (2021), "Determining the capacity of the self-healing network segment", *Advanced Information Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 114–119, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.16>.
10. Petrovska, I. and Kuchuk H. (2022), "Features of the distribution of computing resources in cloud systems", *Control, Navigation and Communication Systems*, No. 2, pp. 75-78, doi: <http://dx.doi.org/10.26906/SUNZ.2022.2.075>.
11. Kuchuk, G., Kovalenko, A., Komari, I.E., Svyrydov, A. and Kharchenko, V. (2019), "Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method", *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 171, Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kacprzyk, J. (Eds.), Springer Nature Switzerland AG, pp. 161-183, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8).
12. Nechausov, A., Mamusuc, I. and Kuchuk, N. (2017), "Synthesis of the air pollution level control system on the basis of hyperconvergent infrastructures", *Advanced Information Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 21–26, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.04>.

Received (Надійшла) 29.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.11.2023

## Синтез комп'ютерної мережі для управління рухомими об'єктами

Н. Г. Кучук, А. П. Шиман

**Анотація.** На сьогодні існує багато методів синтезу базової мережі комп'ютерної системи управління. Але в них не враховується рухомість об'єктів управління. Тому метою статті є розробка методу синтезу базової мережі комп'ютерної системи управління, яка враховує рухомість об'єктів управління. Метод базується на використанні функціонала середніх втрат повідомлень у мережі при вхідному навантаженні і динамічному плані розподілу ресурсів. Незалежно від вибраного класу базової мережі, розроблений метод припускає: вибір відповідного функціонала оцінки ефективності управління; синтез керуючих алгоритмів обмеження доступу до мережі; синтез алгоритмів адаптивної маршрутизації, що забезпечують оптимальний розподіл потоків по КЗ мережі. Напрямок подальших досліджень – врахування розміщення базових станцій комп'ютерної системи.

**Ключові слова:** комп'ютерна система, рухомий об'єкт, базова мережа, оптимізація, синтез, хмарні обчислення, туманні обчислення, комутація пакетів, трафік.



А. О. Подорожняк, С. І. Наймитенко

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

## РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СЕРВІСУ ДЛЯ РОЗУМНОГО ПРОТЕЗУ ВЕРХНІХ КІНЦІВОК

**Анотація.** Об'єктом дослідження даної роботи є процес функціонування розумного протезу що управляється мікропроцесором. **Мета** даної роботи полягає у дослідженні сервісу для розумного протезу верхніх кінцівок. Основним завданням даного дослідження є аналіз аналогів існуючих протезів на ринку, вибір типу протезу для розробки і дослідження, підбір середовища розробки і моделювання, платформи та мікроконтролера, програмна реалізація алгоритму функціонування протезу та дослідження електронної і натурної моделі сервісу для розумного протезу із використанням міоелектричних датчиків. У результаті дослідження існуючих аналогів було виявлено певні проблеми та знайдено шляхи їх вирішення. Виконано підбір компонентів відповідно до поставленої задачі. Виконано розробку та тестування розробленого сервісу на основі віртуального та натурального моделювання. Визначено перспективи розробленого сервісу та виявлено великий потенціал запропонованої розробки для полегшення життя людей які за певних причин не мають функціонуючих верхніх кінцівок та фінансово обмежені при протезуванні.

**Ключові слова:** розумний протез, мікроконтролер, моделювання, програмна реалізація, міоелектричний датчик.

### Вступ. Постановка задачі

Щоденно по новинам генштаб звітується про кількість знищеної техніки, збити ракет, знищених ворогів. Однак ми навіть не уявляємо як важко це дається нашим захисникам. Кожного дня можуть гинути десятки, а то й сотні військових, ще більше отримують поранення різної ступені тяжкості, в тому числі поранення що призводять до ампутації верхніх та нижніх кінцівок. Такі люди в подальшому будуть потребувати протезів, котрі зможуть повернути їх до більш менш нормального функціонального життя. Однак в Україні лише починає розвиватись протезування і люди які отримали травми під час воєнних дій чи то народились із вродженими дефектами тощо, мають чекати довгий час поки їм зроблять протез. Однак навіть до цього етапу значна частина людей не дійде, адже якісне протезування доволі дороге і не всі можуть собі це дозволити.

Пропонована робота орієнтована на дослідження можливостей створення бюджетного та легкого у виробництві протезу верхніх кінцівок, а саме руки та передпліччя. Головна задача протезу – покрити хоча б мінімальні потреби людини у повсякденному житті як, наприклад, тримання столових приборів під час приймання їжі, відкриття дверей чи тримання неважких предметів.

**Мета статті:** ідея даного дослідження полягає в наступному: провести аналіз аналогів існуючих протезів на ринку, вибір типу протезу для розробки і дослідження, підбір середовища розробки і моделювання, платформи та мікроконтролера, програмна реалізація алгоритму функціонування протезу та дослідження електронної і натурної моделі сервісу для розумного протезу із використанням міоелектричних датчиків, а також формулювання перспектив застосування та подальшого розвитку.

### Аналіз ринку протезів верхніх кінцівок

Глобальний ринок протезування верхніх кінцівок – це зростаючий сегмент медичної промисловості, що розвивається завдяки технологічному прогресу та

зростаючій кількості людей з ампутованими кінцівками внаслідок травм чи захворювань. Ринок поділяється на кілька категорій продуктів, таких як штучне протезування, електричне протезування та косметичне протезування [1]. За останні роки ринок протезів верхніх кінцівок став свідком значних змін з точки зору інноваційної продукції та технологічного прогресу. Наприклад, відбувся зсув до міоелектричних протезів, які контролюються м'язовими сигналами від залишкової частини кінцівки, оскільки вони забезпечують більш природні рухи та кращу функціональність порівняно з традиційними протезами [2, 3]. Крім того, розвиток технології 3D-друку дозволив створювати індивідуальні протези, які адаптовані до конкретних потреб і вподобань людини.

Згідно звіту Strategic Market Research вказується на три основні фактори, які сприяють зростанню ринку: збільшення популяції геріатричних лікарів, зростання захворюваності на рак кісток інші хронічні захворювання, технологічний прогрес [4].

Інший звіт від Allied Market Research акцентує увагу на міоелектричних протезах, які очікується, що будуть домінувати на ринку завдяки своїй передовій технології та забезпечуватимуть більшу мобільність і функціональність для користувачів. Звіт також вказує на роль клінік протезування як найбільших кінцевих споживачів протезів верхніх кінцівок (рис. 1) [5].

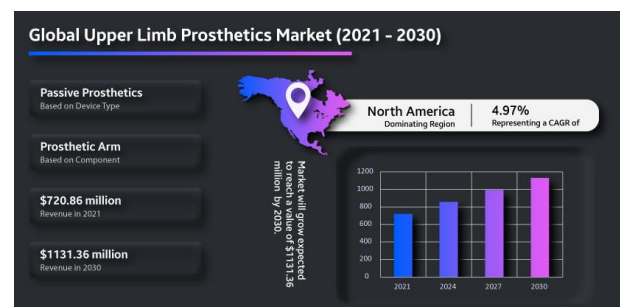


Рис. 1. Глобальний ринок протезування верхніх кінцівок

Прогнозована кількість протезів за видами наведена на рис. 2.

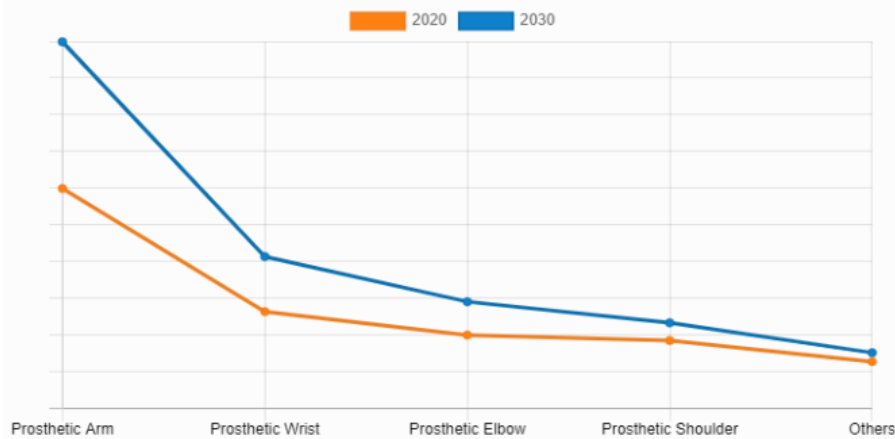


Рис. 2. Популяції протезів верхніх кінцівок

Наразі існують декілька типів протезів серед яких можна визначити наступні: тягові; міоелектричні, гібридні, косметичні, спеціальні. Серед існуючих типів зупинимося на міоелектричних, оскільки саме цей тип протезу буде розроблятися в подальшому [6, 7]. Міоелектричний або електроміографічний протез керується електричними сигналами, що генеруються м'язами залишкової частини кінцівки, або електроміографічними (ЕМГ) сигналами [8]. Протези на основі ЕМГ працюють шляхом вимірювання електричної активності м'язів, яка виникає під час руху або ж напружень м'язів.

### Розробка сервісу

Для проектування сервісу розумного протезу потрібно мати в озброєнні зручне і багатофункціональне середовище розробки та моделювання. У якості середовища, що пропонує потужну гнучку платформу та має в собі широкий діапазон обладнання для розробки сервісу було обрано Proteus 8. Наступним етапом було визначення платформи та мікроконтролера для сервісу. Серед можливих варіантів розглядалися платформи Arduino, Raspberry Pi, ESP32 та stm32.

Через економічні обмеження та досвід авторів було обрано платформу Arduino. Головними її перевагами є зручний інтерфейс програмування, велика кількість фахівців та підтримка доволі широкого спектру мікроконтролерів. Крім того Arduino підтримує багато мов програмування, що дозволяє швидко та ефективно створювати програми для управління різними пристроями.

При розгляді модельного ряду Arduino, було розглянуто Uno, Mega та Nano. Однак вибір впав саме на модель Nano, через її доступність та малі розміри. Зображення використаної платформи наведено на рис. 3.



Рис. 3. Зображення платформи Arduino Nano

Після вибору основних компонентів було визначено узагальнений алгоритм сервісу, який зображено на рис. 4 [9].

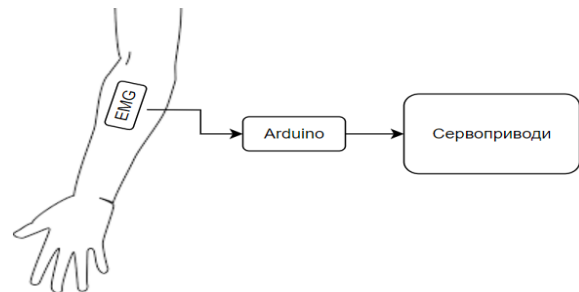


Рис. 4. Узагальнений алгоритм сервісу

При розгляді існуючих моделей ЕМГ датчиків було знайдено проблему – це їх зависока ціна з урахуванням що основна концепція розробки – бюджетний виріб. Використовуючи середовище Proteus та обраний операційний підсилювач LM324n було розроблено схему ЕМГ датчику представлено на рис. 5.

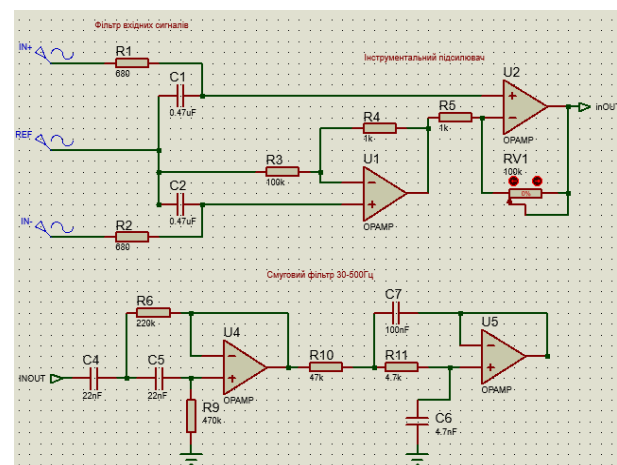


Рис. 5. Схема ЕМГ датчику

Після отримання сигналів з електродів вони проходять фільтрацію аби уникнути небажаних височастотних шумів. Оскільки сигнали поверхневої ЕМГ існують в діапазоні не вище 500Гц, на вході стоїть фільтр низьких частот (ФНЧ) з саме такою частотою зрізу.

Далі отриманий сигнал проходить етап підсилення. Тут реалізовано схему інструментального підсилювача з потенціометром, що забезпечує коефіцієнт підсилення датчику від 2 до 1000. І вже після підсилення сигнал піддається основній фільтрації, аби відокремити саме частоти ЕМГ сигналу (30-500Гц). Фільтр реалізовано на основі топології Баттерворта 4-го порядку.

Узагальнена блок схема алгоритму роботи програми мікроконтролера сервісу розумного протезу представлена на рис. 6.

Після запуску та ініціалізації необхідних змінних програмне забезпечення (ПЗ) зчитує сигнал з виходів ЕМГ-датчика. Потім цей сигнал проходить через етапи дискретизації та додаткової фільтрації, використовуючи спеціальний цифровий фільтр, а саме Баттерворта 4-го порядку, із смугою пропуску 30-500 Гц. Після цього ПЗ визначає максимальний сигнал для подальшого використання при визначенні, чи виконувати рух (стиснення/розслаблення). Рух відбувається за умов, коли користувач напружує м'язи на 2/3 від максимального значення. Окрім цього, використовуються булеві змінні для більш чіткої роботи виробу. Схема під'єднання ЕМГ сигналу після фільтрації та управляючих сервоприводів протезу до мікроконтролера представлена на рис. 7.

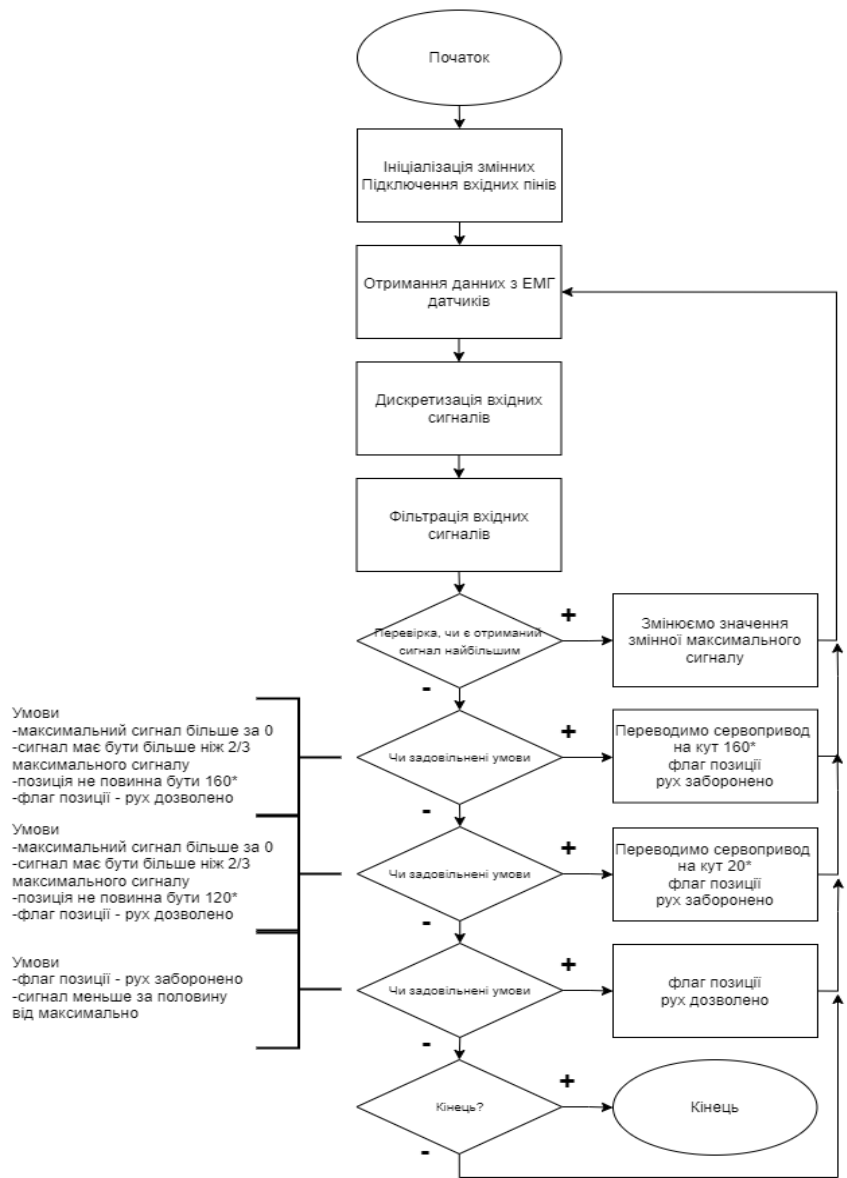


Рис. 6. Узагальнена блок схема алгоритму роботи програми мікроконтролера

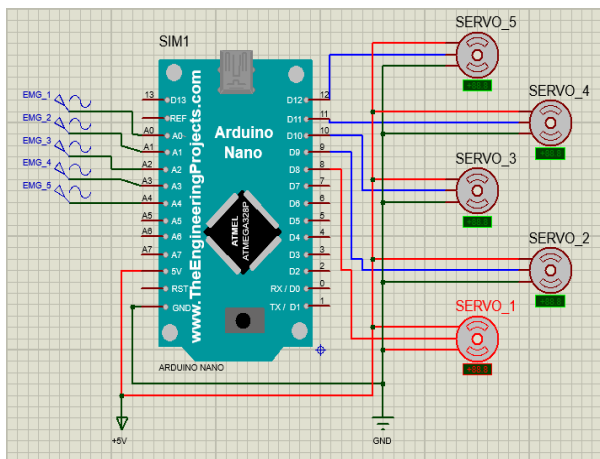


Рис. 7. Схема під'єднання ЕМГ сигналу та управляючих сервоприводів до мікроконтролера

### Дослідження розробленого сервісу

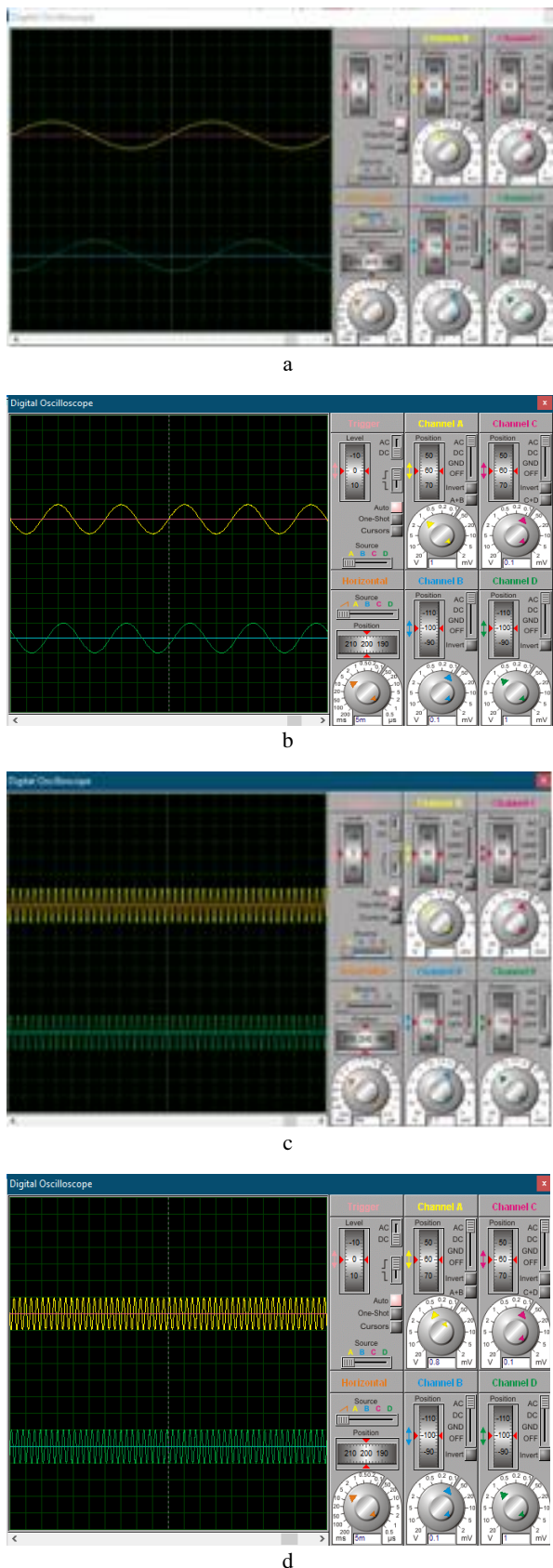
Дослідження працездатності розробленої версії сервісу розумного протезу проводилось як для його

електронної так і для фізичної моделі. Електронне моделювання проводилось в середовищі Proteus 8.

Перевірка роботи ЕМГ датчика моделювалась на схемі представлений на рис. 5. А саме, перевірялась можливість забезпечення підсилення корисного сигналу у полосі 30-500Гц у діапазоні від 100 до 1000 разів. Для цього на входи IN+,IN- подавалися синусоїдальні сигнали амплітудами 0.2 та 0.1 V, значення REF дорівнювало 0 оскільки цей контакт використовувався як еталонний для схеми.

Під час тестування фільтру на його вхід подавалися сигнали різної частоти на входах датчика. Очікувалось, що сигнали які виходять за заданий діапазон пропуску будуть послаблятися. Результат дослідження наведено на рис. 8.

На рис. 8 жовтим кольором позначений сигнал IN+, червоним – IN-, та зеленим – inOUT сигнал. Бачимо очікуваний результат, тобто значне послаблення сигналу (до 1000 разів) на частотах 20 Гц та 550 Гц, відносно сигналів що знаходяться у полосі пропускання (40 Гц та 490 Гц).



**Рис. 8.** Результат роботи фільтра з частотами (а – 10 Гц, б – 40 Гц, с – 490 Гц, д – 550 Гц)

Окрім цього помічено значний зсув сигналу через погану ФЧХ використовуваних фільтрів, що стане предметом додаткових досліджень на реальній схемі у майбутньому.

Також було проведено тестування розробленого ПЗ сервісу, що реалізувало запропонований алгоритм (рис. 6). Під час його тестування було використано схему представлену на рис. 7. Дослідження проводилось у наступному порядку:

а) сервопривод встановлюється в положення 60 градусів та виводиться повідомлення про початок роботи;

б) отримуємо сигнал, зчитуємо максимальне значення після чого записуємо його у змінну;

с) отримані сигнали порівнюються зі значенням  $2/3$  від максимального значення сигналу, після чого якщо отриманий сигнал більше, відбувається дія “стискання”, результат відображається не тільки у віртуальному терміналі, а й на самих сервоприводах;

д) після цього існуюча змінна флагу положення набуде стану “рух заборонено”, мікроконтролер буде чекати послаблення сигналу, а саме до позначки в половину від максимального сигналу, після чого флаг положення змінить на стан “рух дозволено”;

е) після того як флаг положення матиме стан “рух дозволено” відбудеться алгоритм схожий то пункту «б», однак тепер буде фігурувати ще й змінна положення котра не дозволить виконати дію “стискання” повторно;

ф) після виконаного пункту «е» відбудеться повторне виконання пункту «д» і далі пункту «с».

Загалом очікується наступний порядок дій:

a -> b -> c -> d -> e -> d -> c -> d -> e;

Однак також зазначимо що в будь який момент користувач може посилити отримуваний на мікроконтролер сигнал і тоді дія “b” повториться. Наприклад:

a -> b -> c -> d -> b -> e -> d -> c -> d ->

На практиці розглянемо лише 1-й варіант, оскільки всі інші будуть базуватись за ньому.

Результат моделювання роботи схеми для цього варіанту для кожного із зазначених пунктів приведено на рис. 9.

Аналіз наведених результатів моделювання показує, що всі визначені елементи роботи алгоритму роботи сервісу (рис. 6) відпрацьовуються на електронній моделі у повному обсязі.

Також було проведено натурне моделювання ключових елементів сервісу розумного протезу. В процесі натурального моделювання роботи ЕМГ та ПЗ сервісу замість плати Arduino Nano було використано її більш розвинутий аналог Arduino Mega, а роботу сервоприводів імітували світлодіоди.

Під час дослідження працездатності було відтворено схему ЕМГ датчику (рис. 5) на реальних компонентах. Елементи датчику знаходились на макетній платі (рис. 10).

До цієї схеми було додано електроди (рис. 11) які фіксуються на руці користувача (рис. 12).

Після запуску макету було виконано напруження м’язів, в результаті на екрані персонального комп’ютера отримали графік зміни амплітуди міосигналу (рис. 13).

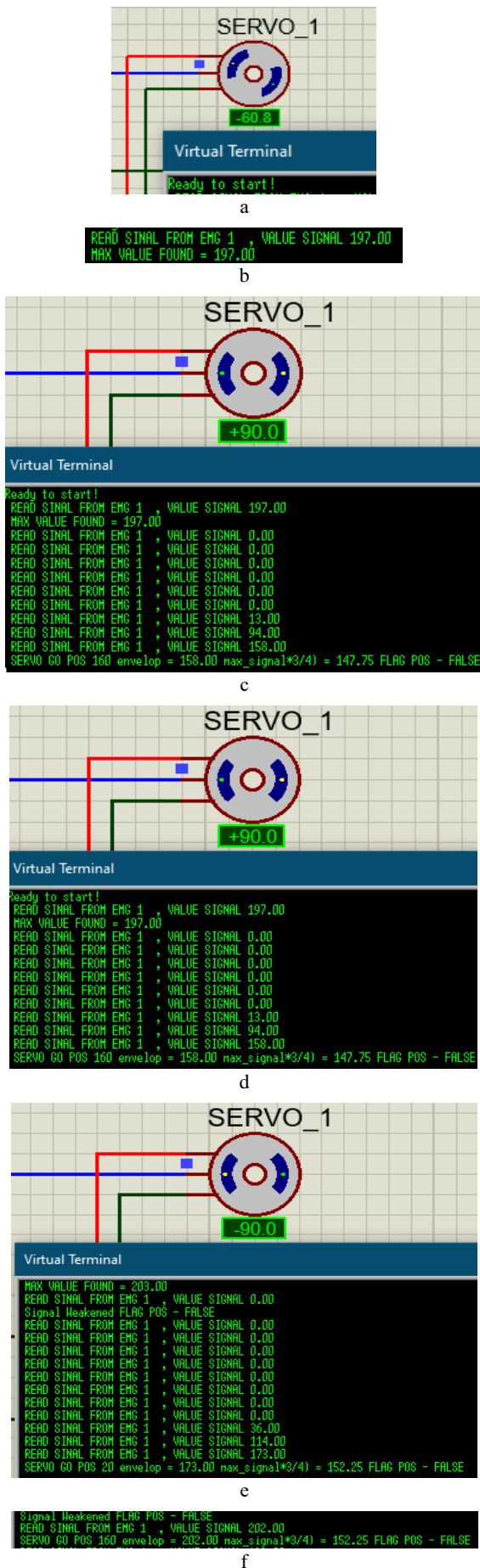


Рис. 9. Результат тестування роботи сервісу із сервоприводом

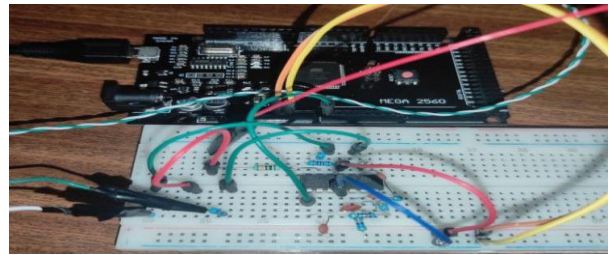


Рис. 10. ЕМГ датчик на макетній платі

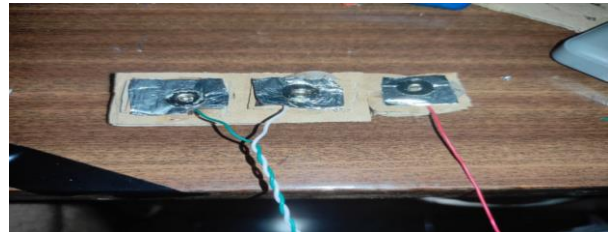


Рис. 11. Зображення електродів (зелений – «+», білий – «-», червоний – «REF»)



Рис. 12. Зображення електродів на руці користувача (а – контакти «+» та «-», б – контакт «REF»)

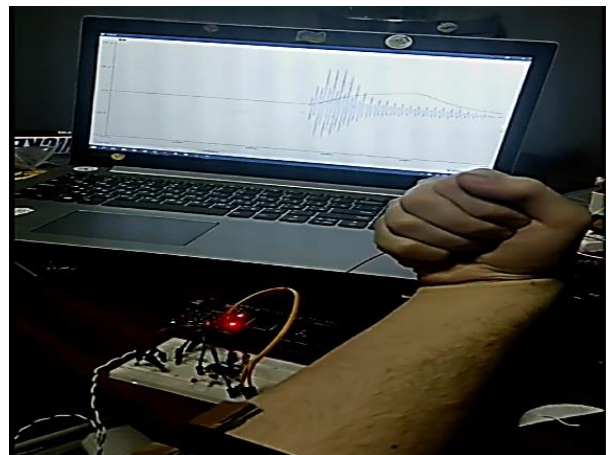


Рис. 13. Зміна амплітуди міосигналу під час напруження м'язів руки

Аналіз отриманих результатів із відомими [10, 11] показав, що змодельований пристрій працює як і очікувалось. Також було проведено дослідження працездатності основного алгоритму (рис. 6) розробленого ПЗ на натурній моделі. Перевірялася зміна порядку горіння світлодіодів (імітують роботу сервоприводів) в залежності від напруження м'язів руки. В результаті дослідження отримали, що напруження м'язів призводить до зміни порядку горіння світлодіодів (рис. 14) у повній відповідності до отриманих результатів електронного моделювання тестування роботи сервісу із сервоприводом (рис. 9).

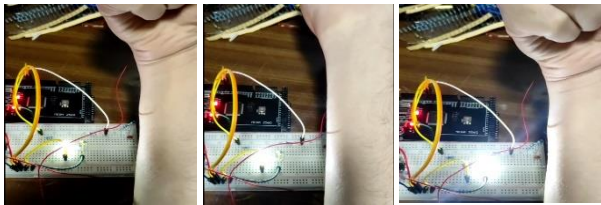


Рис. 14. Зміна порядку горіння світлодіодів у результаті тестування ПЗ мікроконтролера

### Висновки та перспективи подальших досліджень

В ході виконання даної роботи, була виконана розробка та дослідження сервісу розумних протезів.

Було розроблено гнучкий в налаштуванні власний ЕМГ датчик, що має пропускні характеристики які відповідають нормам електроміографії та регульований коефіцієнт підсилення від 2 до 1000.

Створений алгоритм ПЗ сервісу дозволяє користувачу за допомогою короткого напруження виконувати дії стискання/розтискання пальців протеза з використанням сервоприводів.

Розроблений продукт було досліджено на електронній моделі за допомогою середовища Proteus 8, а також на фізичній моделі, використовуючи реальні компоненти. Результатом цього тестування було підтвердження функціональності розробки.

В ході дослідження було виявлено також декілька недоліків розробки пов'язаних з особливістю фільтрації міосигналів, які разом із технологіями штучного інтелекту [12, 13] стануть напрямком подальшого покращення продукту.

Загалом, дана робота має безсумнівний позитивний внесок у розвиток медичних технологій та може бути використана для подальшого вдосконалення біонічних протезів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Types of prostheses: cosmetic, myoelectric, self-powered. – Pohlig GmbH [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.pohlig.net/en/types-of-prostheses-finger-hand-arm>.
2. Igual C. Myoelectric Control for Upper Limb Prostheses. / C. Igual, L. A. Pardo, J. M. Nahne, J. Igual // Electronics. – 2019. – Vol. 8. – Iss. 11. – Article no 1244. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8111244>
3. Jiang N. Myoelectric Control of Artificial Limbs– Is There a Need to Change Focus? / N. Jiang, S. Dosen; K.-R. Muller, D. Farina // IEEE Signal Processing Magazine. – 2012. – Vol. 29, Iss. 5. – P. 152-160. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSP.2012.2203480>
4. Upper Limb Prosthetics Market Size, Trends. Global Growth 2030. Global Market Research Company. – Strategic Market Research. URL: <https://www.strategicmarketresearch.com/market-report/upper-limb-prosthetics-market>.
5. Upper Limb Prosthetics Market Size | Growth Prediction - 2030. – Allied Market Research [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.alliedmarketresearch.com/upper-limb-prosthetics-market-A12065>.
6. Наймитенко С. І. Розробка сервісу для розумного протезу / С. І. Наймитенко, А. О. Подорожняк // Інформаційні технології: наука, техніка, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXX МНТК MicroCAD-2022. Харків: НТУ “ХПІ”. – С. 903.
7. Наймитенко С. І. Апаратно-програмний сервіс для розумного протезу / С. І. Наймитенко, А. О. Подорожняк // Інформаційні технології: наука, техніка, освіта, здоров'я: Тези доп. XXXI МНТК MicroCAD-2023, Харків: НТУ “ХПІ”. С. 1125.
8. Henson A. Introduction to Myoelectric Prostheses. Redefining Possibility – Arm Dynamics [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.armdynamics.com/upper-limb-library/introduction-to-myoelectric-prostheses>.
9. Наймитенко С. І. Розробка та дослідження сервісу для розумного протезу / С. І. Наймитенко, А. О. Подорожняк // Збірник наукових праць за матеріалами XV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2023». 17-18 листопада 2023 року – Хмельницький: ХНУ, 2023. – С. 209-212.
10. Ever A. EMG sensor – Hackaday.io, 04.12.2018 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hackaday.io/project/113338-publys-an-open-source-biosensing-board/log/143756-emg-sensor>.
11. Simple Dry Electrode EMG for Arduino. – Autodesk Instructables [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.instructables.com/Simple-Dry-Electrode-EMG-for-Arduino/>.
12. Kadhim D.A. Comparative analysis of machine learning algorithms on myoelectric signal from intact and transradial amputated limbs / D.A. Kadhim, M.N. Raheema, J.S. Hussein // IAES International Journal of Artificial Intelligence. – 2023. – Vol. 12. – Iss. 4. – P. 1735–1743. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijai.v12.i4.pp1735-1743>.
13. Parzhin Y. Detector neural network vs connectionist ANNs / Y. Parzhin, V. Kosenko, A. Podorozhniak, O. Malyeyeva, V. Timofeyev // Neurocomputing. – 2020. – Vol. 414. – P. 191 – 203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.07.025>.

Received (Надійшла) 23.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.11.2023

### Development and research of a service for upper limbs smart prosthesis

A. Podorozhniak, S. Naimytenko

**Abstract.** The object of research of this work is the process of functioning of a smart prosthesis controlled by a microprocessor. The purpose of this work is to research the service for a smart prosthesis of the upper limbs. The main task of this research is the analysis of analogs of existing prostheses on the market, the choice of the type of prosthesis for development and research, the selection of the development and modeling environment, platform and microcontroller, the software implementation of the algorithm of the prosthesis and the study of the electronic and live service model for a smart prosthesis using myoelectric sensors. As a result of the study of existing analogues, certain problems were identified and ways to solve them were found. The selection of components was carried out in accordance with the task. Development and testing of the developed service was carried out based on virtual and real-life simulation. The prospects of the developed service were determined and the great potential of the proposed development was revealed to facilitate the life of people who for certain reasons do not have functioning upper limbs and are financially limited in prosthetics.

**Keywords:** smart prosthesis, microcontroller, modeling, software implementation, myoelectric sensor.

Б. В. Болібрux<sup>1</sup>, О. О. Козлітін<sup>2</sup>, Д. Б. Осадчий<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

<sup>2</sup>Національний авіаційний університет, Київ, Україна

<sup>3</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

## АКУСТИЧНИЙ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ВПЛИВ КОРОННИХ РОЗРЯДІВ НА СТАН ВИРОБНИЧОГО СЕРЕДОВИЩА

**Анотація.** На основі аналізу досліджень щодо інтенсивності коронних розрядів показано, що електромагнітні випромінювання та акустичний шум, генеровані коронними розрядами, можуть мати прямий та опосередкований негативний вплив на працюючих. Зокрема, опосередкований вплив полягає у впливі нестабільності функціонування технічних засобів на емоційно-психологічний стан людей. Визначено частотні спектри електромагнітних випромінювань коронних розрядів. Показано найбільш прийнятний метод визначення інтенсивності коронних розрядів у залежності від напруженості електричного поля біля поверхні землі. Показані найбільш прийнятні співвідношення між рівнями корисного радіосигналу та рівнями радіозавад. Надано співвідношення щодо згасання рівнів радіозавад з відстанню від джерела випромінювання. Надано частотну залежність інтенсивності радіозавад, що може бути використано при виконанні проєктних робіт. Представлено кількісні значення емісії найбільш поширених бездротових систем та технічних засобів, а також їх стійкості до радіозавад (ноутбуки, сервери, мобільні телефони тощо). Показано, що радіозавади можуть бути причиною не тільки несприятливого впливу на людей, а й спричинити нестабільну роботу обладнання об'єктів критичної інфраструктури через непередбачувані сплески височастотних випромінювань до 1,5–3,5 мВт/см<sup>2</sup>. Визначено, що найбільш суттєвим акустичним впливом ліній електропередачі є звукова частота 100 Гц, та кратні їй. Крім того коронні розряди генерують широкосмуговий шум. Надано розрахунки рівнів шуму. Показано, що емпіричні співвідношення розрахунків рівнів шуму дещо неоднозначні, тому у практичній діяльності, особливо у процесі виконання проєктних робіт, доцільно порівнювати результати з натурними вимірюваннями на діючих об'єктах. Підвищення інтенсивності шуму зі збільшенням кількості дротів у фазі разом зі зниженням напруженості електричних полів біля поверхні дротів відкриває можливість оптимізації конструктивних рішень з точки зору мінімізації несприятливого впливу ліній електропередачі на людей і довкілля в цілому.

**Ключові слова:** коронний розряд, радіозавади, акустичний шум, електромагнітна сумісність.

### Вступ

В умовах сучасного виробництва параметри середовища за усіма фізичними чинниками формуються за рахунок багатьох впливів. Це обумовлено як різноманітністю технологічного обладнання, так і зовнішніми факторами. Одним з таких факторів є коронні розряди, що виникають за високих напруг та нештатних явищ у роботі електротехнічного обладнання.

Більшість досліджень щодо зменшення коронування спрямовані на мінімізацію енергетичних втрат. Але електромагнітні поля середніх та дуже високих частот, які генеруються коронними розрядами, можуть несприятливо впливати на людей та створювати завади технічним засобам, наприклад комп'ютерній техніці, що є опосередкованим негативним впливом на працюючих. Крім того, коронні розряди супроводжуються певним шумом, який створює дискомфортні умови для персоналу.

Ці питання на сьогодні залишаються майже поза увагою через невисокі рівні електромагнітних полів та шуму, але у комплексі з іншими фізичними впливами можуть суттєво впливати на якість виробничого середовища.

Дані питання потребують з'ясування та визначення засобів оцінювання рівнів і шляхів зниження впливу коронування на стан середовища.

### Огляд літературних джерел та постановка задач дослідження

Основними міжнародними нормативними актами, які обмежують інтенсивності коронних розрядів є документи, що регламентують емісію та несприйнятливості електричного та електронного обладнання щодо електромагнітних впливів, наприклад [1, 2].

В Україні інтенсивність коронування регламентується відомчим нормативом [3]. Він спрямований на зниження втрат електроенергії внаслідок коронних розрядів.

Це обумовлює виконання досліджень щодо розроблення і впровадження заходів і засобів зі зниження втрат електроенергії на корону.

У роботі [4] запропоновано спосіб діагностування ліній електропередачі за акустичним спектром коронного розряду.

Дослідження [5] стосується також виявлення коронування у автоматичному режимі. Ці дослідження дозволяють своєчасно виявити нештатні явища та ліквідувати їх.

Серія досліджень у підсумку сприяла науковому обґрунтуванню визначення впливу коронних розрядів на якість електроенергії [6]. Але такі дослідження не стосуються прямого та опосередкованого впливу коронних розрядів на людей.

У роботі [7] показано, що своєчасне проведення регламентних робіт на енергетичних об'єктах мінімізує виникнення корони.

Це ж стосується роботи [8], де показано, що нагальною потребою для зниження електромагнітних впливів на людей є забезпечення оптимізації розміщення обладнання.

На сьогодні встановлено, що шум малої інтенсивності, навіть низькочастотний, негативно впливає на людей [9].

Внаслідок коронних розрядів відбувається іонізація повітря, але при цьому неконтрольовано генерується озон та оксиди азоту, що шкідливо для людей. Внаслідок деіонізації атмосферного повітря через експлуатацію технічних засобів [10] у приміщеннях широко використовують пристрої штучної іонізації повітря.

Але більшість з них працює за принципом коронного розряду, що негативно впливає на людей [11].

На сьогодні не розроблено системного підходу щодо визначення ступеню впливу коронних розрядів на людей у виробничих умовах із урахуванням необхідності забезпечення електромагнітної сумісності технічних засобів

**Мета роботи** – визначення інтенсивності просторових поширень електромагнітних полів та шуму коронних розрядів та визначення умов мінімізації їх впливу на людей у виробничих умовах.

### Викладення основного матеріалу

Найбільшу інтенсивність коронний розряд має на лініях електропередачі. Він створює завади роботі усій електронній апаратурі, яка використовує бездротовий зв'язок, а також акустичний шум. Найбільша інтенсивність радіозавад та шуму обумовлена стримерними розрядами на дротах.

Стримерна корона виникає за будь-яких умов у залежності від напруги та неоднорідності електричного поля, але найбільш сприятливі умови є за наявності опадів. Найсильніші радіозавади і шум виникають на високовольтних лініях під час дощу. Але за сухої погоди коронні розряди виникають у місцях пошкодження ізоляторів, гірлянд, забруднені дротів тощо.

Корона притаманна гірляндам з ушкоджених або забруднених керамічних ізоляторів.

Спектр частот електромагнітного випромінювання має діапазон від 10 кГц до 1 ГГц, але завади з частотами, вищими за 30 МГц виникають за коронування ліній напругами від 220 кВ.

Інтенсивність радіозавад характеризується вертикальною складовою напруженості електричного поля поблизу поверхні землі. Вона визначається співвідношенням:

$$I = 10 \lg \left( \frac{E_2}{E_1} \right)^2 = 2 \lg \frac{E_2}{E_1},$$

де  $E_2$  – напруженість електричного поля біля поверхні землі;  $E_1$  – базове значення.  $E_1$  зазвичай приймають за 1 мкВ/м.

Тобто, у розрахунках можна вважати:

$$I = 20 \lg E_2.$$

Згідно з рекомендацією Міжнародного комітету з радіозавад за розрахункову частоту береться частота 0,5 МГц.

Рівень корисного сигналу на цій частоті складає приблизно 60 дБ. Робота радіоапаратури вважається стабільною, якщо корисний сигнал перевищує завади на 20 дБ.

Тому за сприятливих погодних умов прийнятний рівень радіозавад складає 40 дБ. Це значення відповідає напруженості електричного поля біля поверхні землі 100 мкВ/м. Згідно чинних нормативів, така напруженість електричного поля радіозавад є допустимою на відстані 100 м від проєкції кратного фазного дроту лінії електропередачі напругою 330 кВ на землі.

Натурні вимірювання свідчать, що наведена межа досягається навіть на лініях меншої напруги, що обумовлено технічним станом арматури.

Рівні радіозавад знижуються з відстанню, що цілком природно.

$$\Delta I = 20k \lg \frac{l_1}{l_2},$$

де  $l_1, l_2$  – відстані від джерела випромінювання;  $k$  – коефіцієнт згасання. Для частот 0,15–1,00 МГц від складає 1,6.

Залежність між рівнями радіозавад і напруженості електричного поля на поверхнях дротів лінійна і відповідає емпіричному співвідношенню:

$$I_2 - I_1 = K_1(E_2 - E_1),$$

де  $E_2, E_1$  – напруженості електричного поля на поверхнях дротів;  $I_2, I_1$  – відповідні рівні радіозавад;  $K_1$  – коефіцієнт пропорційності. Для напруженостей полів 20–30 кВ/см  $K_1 = 1,8$ .

Слід зазначити, що в усіх розрахунках напруженість електричного поля визначається у кВ/см. Це відповідає розрахунковому апарату, затвердженому відповідними національними нормативами.

Слід зазначити, що рівні радіозавад знижуються зі зростанням частоти електромагнітного випромінювання. У діапазоні частот 0,15–5,00 МГц рівень радіозавад по відношенню до їх рівня на частоті 0,5 МГц визначається як:

$$I_f = 5,5 \left[ 1 - 2(\lg 10f)^2 \right],$$

де  $f$  – частота, МГц.

Це дає змогу оцінити радіозавади, які генерує тиме лінія електропередачі, що проєктується. Для цього необхідно мати надійні дані щодо лінії, яка перебуває у експлуатації.

$$I_2 = I_1 + 1,8(E_2 - E_1) + 40 \lg \frac{K_2}{K_1}.$$

На сьогодні проблемою є наявність коронних розрядів усередині приміщень, що притаманне



об'єктам енергетики і частково іншим приміщенням, наприклад, у яких використовується високовольтна апаратура.

Прикладом можуть бути високовольтні іонізатори повітря, які є різновидами люстри Чижевського.

При визначенні рівнів електромагнітної сумісності сучасної електронної техніки слід враховувати її емісійні властивості обладнання та його сприйнятливості щодо електромагнітних завад (табл. 1, 2).

Таблиця 1 – Рівні випромінювання щодо електромагнітної сумісності апаратури

Notebook	-36 дБм
Wi-Fi роутер	-30 дБм
Сервер	-40 дБм
Мобільний телефон	-25 дБм
DTU - T2 приймач	-26 дБм

Таблиця 2 – Чутливість обладнання

Бездотовий мікрофон	-110 дБм
Bluetooth	-90 дБм
Wi-Fi 802-11	-90 дБм
FM - приймач	-110 дБм
DTU - T2 приймач	-80 дБм

Не дивлячись на малі значення щодо емісії так і достатню стійкість апаратури, необхідно враховувати значні коливання випромінювань радіозавади.

Наприклад, у процесі вимірювань щільностей потоків енергії у багатьох виробничих приміщеннях – диспетчерських аеропортів, машинних залах генераторів електроенергії, лабораторіях електричних машин системним явищем були раптові сплески високочастотних випромінювань рівнів 1500–3500 мкВт/см<sup>2</sup>. Це потрібно враховувати у практичній діяльності.

Відомо, що акустичний шум генерується коронними розрядами здебільшого за наявності високої вологості повітря, але за ушкоджень апаратури суттєвий шум виникає і за сухої й сонячної погоди. Експериментально встановлено, що шипіння від корони відповідає частоті звуку 100 Гц та кратним її частотам. Також генерується ширококутовий шум.

Частота 100 Гц не випадкова. Вона обумовлена рухом об'ємного заряду у дротах двічі за період, що відповідає промисловій частоті напруги 50 Гц. При цьому створюються хвилі звукового тиску.

Ширококутовий шум генерується стримерною короною.

Вимірювання таких шумів здійснюється і нормується за шкалою корекції «А» з урахуванням чутливості слуху людини.

Найбільш суттєві рівні звуку під час дощу і туману. Рівні гучності перевищують звичайний звуковий фон на 5–6 дБА.

Для визначення гучності можна використовувати емпіричне співвідношення:

$$L = 16 + 1,14E + 9r + 15 \lg n - 10 \lg l,$$

де  $L$  – рівень гучності, дБА;  $r$  – радіус дротів, см;  $E$  – максимальна напруженість електричного поля поверхні дротів, кВ/см;  $n$  – кількість дротів у розщепленій фазі;  $l$  – відстань від крайнього фазного дроту до місця визначення гучності, м.

Слід зауважити, що існують розбіжності щодо визначення гучності ліній електропередачі.

Наприклад, застосовується таке співвідношення:

$$L = 20 + 0,0111E + 900r + 15 \lg n - 20 \lg l,$$

де  $L$  – рівень звуку, дБА;  $r$  – радіуси дротів, м;  $E$  – діюче значення максимальної напруженості електричного поля на поверхні дротів, кВ/м;  $n$  – кількість дротів у розщепленій фазі;  $l$  – відстань від крайнього фазного дроту, м.

При цьому напруженість електричного поля на поверхні дротів визначається зі співвідношення:

$$E = \frac{CU}{2\sqrt{3}\pi\epsilon_0 r},$$

$U$  – діюча напруга, В;  $C$  – ємність одного дроту, Ф;  $\epsilon_0$  – електрична стала, (8,85\*10<sup>-12</sup> Ф/м);  $r$  – радіуси дротів, м.

У свою чергу ємність дроту розраховується як:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln(d/r)}.$$

де  $\epsilon$  – відносна діелектрична проникність повітря,  $d$  – середньгеометрична відстань між дротами, м.

Як видно з наведених співвідношень, інтенсивність шуму зростає при збільшенні кількості дротів у фазі, що забезпечує зниження допустимої напруженості електричного поля на поверхні дротів. Тобто, у процесі виконання проектних робіт та оцінювання генерації шуму можлива раціоналізація параметрів із забезпечення прийнятних значень щодо виникнення коронних розрядів та генерації електромагнітних та акустичних дротів.

## Висновки

1. Показано, що коронні розряди є суттєвим джерелом радіозавад, які спричиняють проблеми щодо електромагнітної сумісності електронної апаратури та негативно впливають на працюючих (прямо та опосередковано). Коронні розряди генерують акустичний шум гігієнічно значущих рівнів, що у поєднанні з іншими техногенними факторами складає суттєвий несприятливий комбінований вплив на людей.

2. Надано частотний спектр та співвідношення щодо визначення інтенсивності коронних розрядів від ліній електропередачі. Це дозволяє визначити зони безпечного перебування персоналу у відповідності з діючими санітарно-гігієнічними нормами.

3. Визначенні значення емісії та стійкості найбільш поширеної електронної апаратури, яка використовує бездротові способи передачі інформації, що дозволяє забезпечувати її стабільну роботу за

рахунок її взаємного розташування та розміщення у зонах мінімального зовнішнього впливу.

4. Надано засади визначення рівнів акустичного шуму коронних розрядів, що доцільно для вико-

ристання у процесі виконання проєктних робіт. Необхідною умовою є порівняння розрахунків з даними щодо ліній електропередачі, які перебувають у експлуатації.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ETSI EN 300 220-2 V2.4.1 (2012-01). Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Radio equipment to be used in the 25 MHz to 1 000 MHz frequency range with power levels ranging up to 500 mW; Part 2: Harmonized EN covering essential requirements under article 3.2 of the R&TTE. Directive. European Telecommunications Standards Institute, 2012. 20 p. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/300200\\_300299/30022002/02.04.01\\_40/en\\_30022002v020401o.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022002/02.04.01_40/en_30022002v020401o.pdf) (дата звернення: 17.05.2023).
2. ETSI EN 301 489-1 V2.2.1 (2019-03). ElectroMagnetic Compatibility (EMC) standard for radio equipment and services; Part 1: Common technical requirements; Harmonised Standard for ElectroMagnetic Compatibility. Directive. European Telecommunications Standards Institute, 2019. 36 p. URL: [http://uas.org.ua/wp-content/uploads/2019/04/en\\_30148901v020201a.pdf](http://uas.org.ua/wp-content/uploads/2019/04/en_30148901v020201a.pdf) (дата звернення: 17.05.2023).
3. СОУ НЕК 29.240.1-13:2019 (EN 50341-1:2012, IDT) Повітряні лінії електропередавання напругою понад 1 кВ змінного струму. Частина 1. Загальні технічні характеристики. (Наказ від 07.05.2019 № 262).
4. Карпалюк І.Т., Гриб О.Г., Швець С.В. Рудевич Н.В., Захаренко Н.С. коронного розряду на струмопровідних частинах електричної системи за акустичними коливаннями. Науково-технічний збірник гірничо електромеханіка та автоматика Національного ТУ «Дніпровська політехніка»: Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2019. №102. С. 3–7
5. M. Rezinkina, O. Rezinkin, I. Karpaliuk and V. Grabko, "Control and Monitoring of Power Transmission Lines Condition over Wide Area with the Help of UAVs," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 172-175, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160150.
6. Карпалюк І. Т. Методи та засоби оцінки впливу коронного розряду на якість електропостачання: дис. д-ра техн. наук спец. 05.09.03: Харків, 2020. – 333 с.
7. Паньків Х.В. Нормалізація фізичних факторів виробничого середовища енергетичних об'єктів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 Київ, 2016. 22 с.
8. Глива В.А., Ходаковський О.В., Тихенко О.М., Панова О.В. Засоби керування електромагнітною обстановкою в умовах її часових та просторових змін. Управління розвитком складних систем. 2019. Вип. 39. С. 199–205.
9. Sihar I. Numerical modelling of transient low-frequency sound propagation and vibration in buildings. Eindhoven: Eindhoven University of Technology. 2022. 213 p.
10. Bolibrukh, B., Glyva, V., Kasatkina, N., Levchenko, L., Tykhenko, O., Panova, O., Bogatov, O., Petrunok, T., Aznaurian, I., & Zozulya, S. (2022). Monitoring and management ion concentrations in the air of industrial and public premises. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(10(115)), 24–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253110>.
11. Електростатичний повітряний фільтр-іонізатор: пат. 87189 Україна, МПК: В03С 3/08. № 2013100086; заявл. 14.08.2013; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 2. 4 с.

Received (Надійшла) 02.10.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.11.2023

#### Acoustic and electromagnetic influence of corona discharges on the condition of the production environment

B. Bolibrukh, O. Kozlitin, B. Osadchiy

**Abstract.** Based on the analysis of studies on the intensity of corona discharges, it is shown that electromagnetic radiation and acoustic noise generated by corona discharges can have a direct and indirect negative impact on workers. In particular, the indirect influence consists in the influence of the instability of the functioning of technical means on the emotional and psychological state of people. Frequency spectra of electromagnetic radiation of corona discharges were determined. The most acceptable method of determining the intensity of corona discharges depending on the intensity of the electric field near the earth's surface is shown. The most acceptable ratios between the levels of the useful radio signal and the levels of radio interference are shown. The ratio of the attenuation of radio interference levels with the distance from the radiation source is given. The frequency dependence of the intensity of radio interference is given, which can be used when performing project works. Quantitative emission values of the most common wireless systems and technical devices, as well as their resistance to radio interference (laptops, servers, mobile phones, etc.) are presented. It is shown that radio interference can cause not only an adverse effect on people, but also cause unstable operation of equipment of critical infrastructure facilities due to unpredictable bursts of high-frequency radiation up to 1.5–3.5 mW/cm<sup>2</sup>. It was determined that the most significant acoustic impact of power transmission lines is a sound frequency of 100 Hz and its multiples. In addition, corona discharges generate broadband noise. Calculations of noise levels are provided. It is shown that the empirical ratios of noise level calculations are somewhat ambiguous, therefore, in practical activities, especially in the process of project works, it is advisable to compare the results with field measurements at existing facilities. An increase in noise intensity with an increase in the number of wires in a phase together with a decrease in the intensity of electric fields near the surface of the wires opens up the possibility of optimizing design solutions from the point of view of minimizing the adverse impact of power transmission lines on people and the environment as a whole.

**Keywords:** corona discharge, radio interference, acoustic noise, electromagnetic compatibility.

А. С. Беліков, Є. О. Железняков

Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпро, Україна

## ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ УМОВ МІКРОКЛІМАТУ ТА БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ПРИ АВАРІЙНИХ ВІДКЛЮЧЕННЯХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

**Анотація.** **Мета.** Дослідження ризику досягнення критичних умов експлуатації систем теплопостачання при аварійних ситуаціях із урахуванням конструктивних особливостей будівель та забезпечення необхідних умов мікроклімату. **Методика.** Теоретичні та експериментальні дослідження на основі фундаментальних знань у галузі теплових процесів та методик вирішення завдань теплообміну, методів математичної статистики та прогнозу, моделювання зміну температурного режиму приміщень при відключеннях систем теплопостачання. **Результати.** Проведені дослідження та визначені закономірності критичних умов мікроклімату одержані при натурних дослідженнях та теоретико-експериментальних дозволяють зробити висновок, що одержані результати досліджень в повній мірі відповідають визначенню реальних умов мікроклімату в приміщеннях при аварійних відключеннях систем теплопостачання. При цьому різниця визначених значень прогнозу теоретичних досліджень і натурних не перевищує 5%, що допустимо в інженерних дослідженнях. Проведенні дослідно-промислові випробування дозволили при дефіцитах теплової енергії теплопостачальним організаціям підвищити надійність забезпечення встановленої мінімально допустимої температури внутрішнього повітря в приміщеннях, а також не допустити досягнення критичних температур та збільшити час живучості систем теплопостачання, за рахунок впровадження комплексної системи автоматизованого контролю та управління параметрами мікроклімату приміщень при аварійно-дефіцитних ситуаціях в системах теплопостачання. **Наукова новизна.** Встановлення закономірностей впливу конструктивних особливостей будівель на підтримання умов мікроклімату приміщень при аварійних ситуаціях в системах теплопостачання, що дозволяє керувати режимом теплопостачання для забезпечення необхідних умов мікроклімату в приміщеннях та недопущення виникнення критичних умов експлуатації систем теплопостачання. **Практичне значення.** Вдосконалення прогнозування граничних умов ліквідації наслідків аварійних ситуацій в системах теплопостачання дозволяє оптимізувати діяльність ремонтно-рятувальних служб, що є особливо важливим у зв'язку із виходом з ладу застарілих систем теплопостачання та бойовими діями на території країни.

**Ключові слова:** аварійні відключення; мікроклімат; зовнішні кліматичні умови; конструктивні особливості, критичні умови мікроклімату.

### Вступ

Встановлено, що питання забезпечення умов мікроклімату приміщень будівель та споруд в холодну пору року мають виняткову важливість, оскільки вони є основою забезпечення безпеки життєдіяльності та здоров'я людей.

Особливу актуальність ці питання отримують в умовах зростання в Україні чисельності аварійних ситуацій в системах теплопостачання, як внаслідок високого рівня зношеності їх інфраструктури загалом, так і надзвичайних ситуацій воєнного часу.

Визначені обставини перешкоджають підтриманню нормального стану здоров'я та життєдіяльності населення, можуть призвести до непоправних порушень та руйнування систем життєдіяльності об'єктів, через вихід систем теплопостачання з ладу.

Тому, проведення досліджень із забезпечення безпеки експлуатації систем теплопостачання при аварійних відключеннях через визначення закономірностей зміни температури в приміщеннях, досягнення критичної температури та часу роботи систем теплопостачання із урахуванням просторового розташування приміщень в будівлях та їх конструктивних особливостей є актуальною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Процес дослідження умов мікроклімату приміщень потребує врахування впливу просторового розташування приміщення у будівлі та дії зовнішніх кліматичних факторів, котрі через зовнішні огорожувальні конс-

трукції забезпечують взаємодію між замкнутим простором приміщення та навколишнім середовищем.

Як відомо із експлуатаційної практики кутові приміщення та приміщення із великою площею зовнішніх огорожувальних конструкцій, відрізняються значними температурними коливаннями внутрішнього повітря. Значні температурні коливання створюють несприятливий вплив на самопочуття людей [16–19]. Тому проведення досліджень та визначення  $t_{\text{вн}}^{\circ\text{C}}$  температури внутрішнього повітряного середовища стало проблемою сьогодення [1–3].

**Мета дослідження.** Апробація результатів дослідження визначення критичних умов мікроклімату при аварійних ситуаціях у системах теплопостачання із урахуванням просторового розташування приміщень всередині будівель та споруд і конструктивних особливостей будівель.

**Методи дослідження.** Теоретичні та експериментальні дослідження на основі фундаментальних знань у галузі теплових процесів та методик вирішення завдань теплообміну, методів математичної статистики та прогнозу.

### Викладення основного матеріалу

У залежності від особливостей просторового розташування приміщення всередині будівлі, впливу теплофізичних характеристик огорожувальних конструкцій та дії зовнішніх кліматичних факторів параметри мікроклімату можуть приймати як допустимі та оптимальні, так і критичні значення [5, 8, 17].

Встановлено, що у випадку коли характер впливу зовнішнього середовища та теплоакумуляційна здатність огорожувальних конструкцій є величинами відомими, то виникає можливість оптимізувати як якість, так і кількість теплової енергії, що є необхідною для підтримки всередині будівлі оптимальних параметрів мікроклімату [4–6].

В результаті досліджень [2,3,11] встановлено, що при забезпеченні нормативного значення повітрообміну приміщень за рахунок зовнішнього повітря в будівлях підтримуються такі вологість і рухливість внутрішнього повітря, які не змінюють визначального впливу температурних показників на теплові умови. Тому при розрахунках забезпеченості теплового режиму можна враховувати тільки температурний фактор мікроклімату.

Тому дослідження змін параметрів мікроклімату приміщень житлових будівель, викликаних аварійними ситуаціями та відключеннями систем теплопостачання, із урахуванням просторового розташування приміщень в будівлях, їх конструктивних особливостей та дії зовнішніх кліматичних факторів, потребує визначення закономірностей зміни температури в

приміщеннях, досягнення критичної температури та часу роботи систем теплопостачання.

Визначено, що порушення в роботі систем теплозабезпечення призводить до виникнення в приміщеннях житлових будівель дискомфортних умов, що не відповідають вимогам санітарних норм [16,17].

Крім того, при аварійному відключенні та тривалому простій обслуговування інженерних комунікацій технічні пристрої схильні до виходу із ладу при температурі повітря в приміщенні  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  і нижче і можуть вимагати значних матеріальних витрат на їх відновлення в майбутньому.

Дослідження було проведено в період з 12.01.2023 по 17.03.2023 на об'єкті: житловий будинок за адресою м. Дніпро, вул. С. Бандери, 13, квартири двух- та трьохкімнатні. У кімнатах були визначені точки виміру температури внутрішнього повітря та температури огорожувальних конструкцій при моделюванні аварійно-дефіцитних ситуацій в системах теплопостачання. На рис. 1 та 2 наведені схеми приміщень та точки виміру з урахуванням конструктивних-особливостей приміщень.

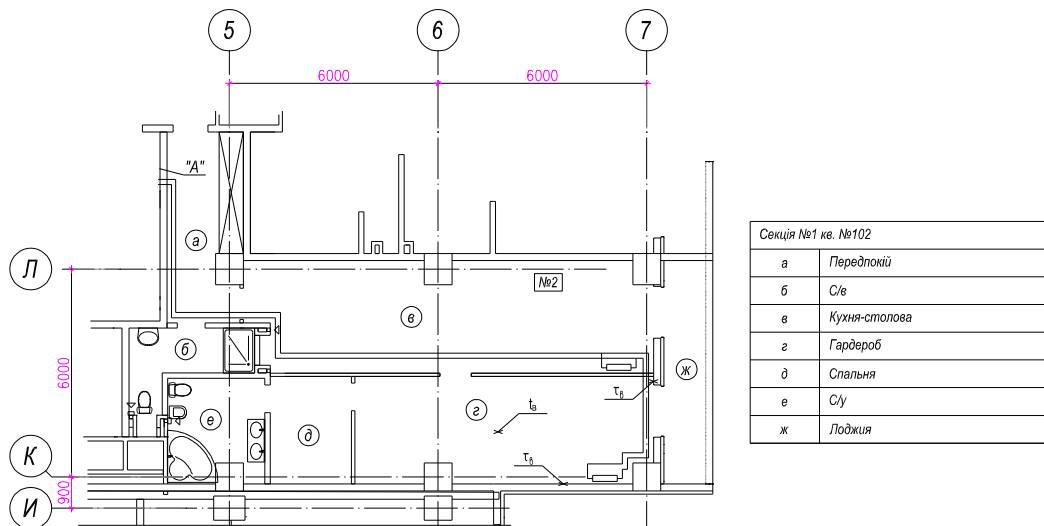


Рис. 1. Схема приміщення двокімнатної квартири та точки виміру

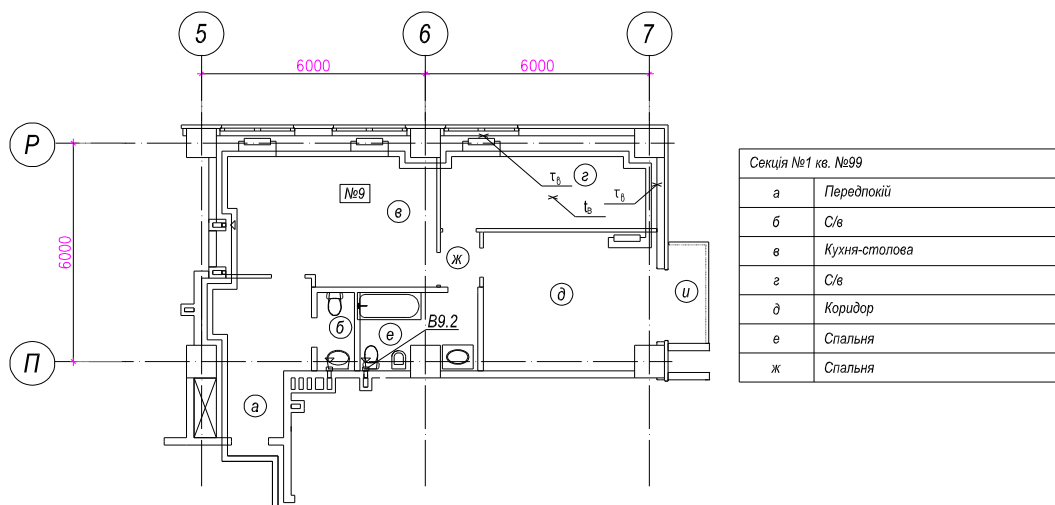


Рис. 2. Схема приміщення трьохкімнатної квартири та точки виміру

Виконані для практичних досліджень теплотехнічні вимірювання, дозволили встановити залежності зміни температури внутрішнього повітря та температури внутрішньої поверхні стінки та визначити похибки натурних досліджень та теоретико-експериментальних досліджень, одержаних в роботі.

В якості засобів вимірювання застосовувались біметалічний термометр із плоскою спіраллю – для вимірювання температури внутрішнього повітря; цифровий термометр testo 905-T2 із зондом температури поверхні – для вимірювання температури на внутрішній поверхні стінки.

При визначенні результатів дослідження враховувалась недосконалість виготовлення засобів вимірювання, неточність їх градування, вплив зовнішніх фізичних чинників (температури, відносної вологості, електромагнітного імпульсу, вібрації тощо), суб'єктивні помилки оператора і ряд інших

чинників зумовлюють неминуче виникнення похибок.

На основі проведеного аналізу одержаних даних була визначена похибка вимірювання застосованих засобів вимірювання. При монтажі приладів для виміру температури нами було враховано, що точність виміру температури залежить не тільки від класу приладу, але і від місця, де встановлюють елементи датчиків. При цьому, для даних умов вимірів температури враховувалось розміщення засобів контролю таким чином, щоб фіксувалася найбільш характерна температура процесу.

На основі проведених натурних досліджень було встановлено (рис. 3–5) закономірності зміни параметрів температури повітря та температури на поверхні огорожувальних конструкцій при моделюванні закритичних ситуацій в роботі системи тепlopостачання.

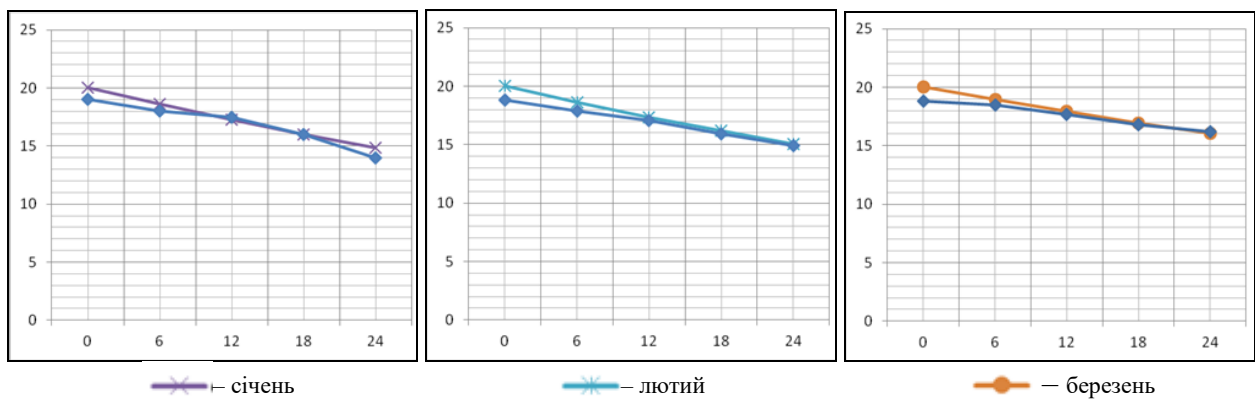


Рис. 3. Зміна температури внутрішнього повітря для 3-х кімнатної квартири ( — натурні виміри)

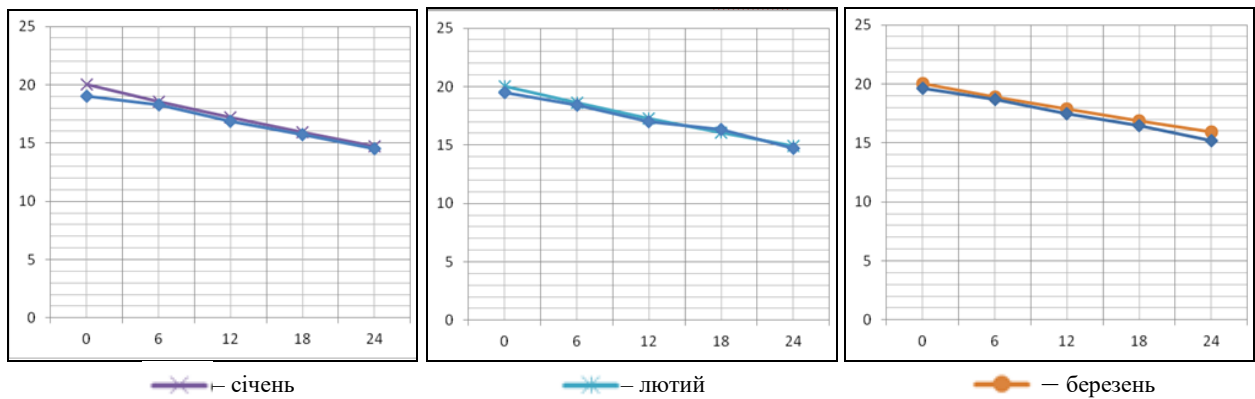


Рис. 4. Зміна температури внутрішнього повітря для 2-х кімнатної квартири ( — натурні виміри)

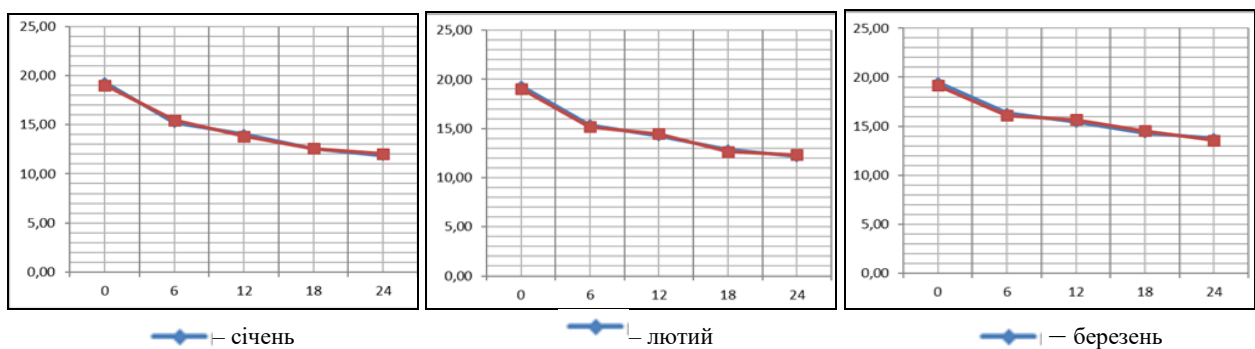


Рис. 5. Зміна температури внутрішньої поверхні стіни ( — натурні виміри)

Проведені дослідження та визначенні закономірності одержані при натурних дослідженнях та теоретико-експериментальних дозволяють зробити висновок, що одержанні результати досліджень в повній мірі відповідають визначенню реальних умов мікроклімату в приміщеннях при аварійних відключеннях систем теплопостачання. При цьому різниця визначених значень прогнозу теоретичних досліджень і натурних не перевищує 5%, що допустимо в інженерних дослідженнях. Контроль температури внутрішнього повітря у період охолодження передбачає своєчасне включення системи резервно-переривчастого опалення при досягненні мінімального значення температури. Запропонована методика дозволила визначити для обраного варіанту будівлі очікувану температуру внутрішнього повітря  $t_B$ , котра встановиться в приміщенні через час  $Z$  після порушення нормального теплового режиму при аварійних відключеннях систем теплопостачання. Проведені дослідно-промислові випробування дозволили при дефіцитах теплової енергії теплопостачальним організаціям підвищити надійність забезпечення встановленої мінімально допустимої температури внутрішнього повітря в приміщеннях, а також не допустити досягнення критичних температур та збільшити час живучості систем теплопостачання, за рахунок впровадження комплексної системи

автоматизованого контролю та управління параметрами мікроклімату приміщень при аварійно-дефіцитних ситуаціях в системах теплопостачання.

### Висновки

Проведені дослідження та визначенні закономірності одержані при натурних дослідженнях та теоретико-експериментальних дозволяють зробити висновок, що одержанні результати досліджень в повній мірі відповідають визначенню реальних умов мікроклімату в приміщеннях при аварійних відключеннях систем теплопостачання. При цьому різниця визначених значень прогнозу теоретичних досліджень і натурних не перевищує 5%, що допустимо в інженерних дослідженнях.

Проведені дослідно-промислові випробування дозволили при дефіцитах теплової енергії теплопостачальним організаціям підвищити надійність забезпечення встановленої мінімально допустимої температури внутрішнього повітря в приміщеннях, а також не допустити досягнення критичних температур та збільшити час живучості систем теплопостачання, за рахунок впровадження комплексної системи автоматизованого контролю та управління параметрами мікроклімату приміщень при аварійно-дефіцитних ситуаціях в системах теплопостачання.

### REFERENCES

1. Belikov A.S., Kozhushko A.P., Safonov V.V. Protection of labour on the enterprises of build industry, 2010, Dnepropetrovsk, UA.
2. Grudzynsky, M. M., Livchak, V.N., Poz, M. Ya (1982) Heating-ventilation systems of buildings of the promoted floor, Moscow.
3. Gubernsky Ye.D., Korenevskaya Ye. I. Hygienic bases of conditioning of microclimate of dwelling and public buildings], 1978, Medicine, Moscow, SU. (in Russian)
4. I. L. Vetvitskiy, V. Y. U. Kaspiytseva, I. A. Kolesnik, A. A. Shevchenko. Investigation of the influence of heat-conducting inclusions on the parameters of the microclimate of premises when the heating system is turned off. Academic Journal (Construction, Materials science, Mechanical Engineering). 2013, iss. 70, pp. 65–69. (in Russian).
5. Danilov M. P., Vetvitskiy I. L., Chesanov L. G., Kolesnik I. A. Данилов М. П. Thermal stability of buildings in the ecosystem "Environment-building-man" (emergency-deficient thermal regimes, solar and wind aspects) 2005, Dnipro, 263 pp.
6. Belikov A.S., Kolesnik I. A., Ragimov S. YU., Maladyka I. G., Vovk D. V Study of the influence of heat-conducting inclusions on the microclimate of premises in emergency situations in heat supply systems. Academic Journal (Construction, Materials science, Mechanical Engineering). 2017, iss. 98 pp. 20–24. (in Russian).
7. Strezhekurov E. Ye., Gashko S. V. Investigation of thermo-radiation stress in hot shops of metallurgical production. Academic Journal (Hygiene and sanitation). 1980, iss. 9 pp. 62–64. (in Russian).
8. Tabunshchikov YU. A. Construction concepts for buildings of the XXI century in the field of heat supply and air conditioning. Academic Journal (ABOK). 2005, iss. 4 pp. 4–7. (in Russian).
9. Borkhert R., Yubits V. Infrared heating technique. 1963, Gosenergoizdat, Moscow, SU. (in Russian)
10. Shklover A. M., Vasil'ev V. F., Ushakov F. V. Fundamentals of building heat engineering for residential and public buildings. 1982, Stroyizdat, Moscow, SU. (in Russian)
11. GOST 12.1.005-88. General sanitary and hygienic requirements for the air in the working area]. [Valid from 1989-01-01]. Official edition. Moscow. Soviet Union (in Russian).
12. SCN V.2.5-67:2013. Heating, ventilation, air conditioning. [Valid from 2013-01-01]. K.: 2013, (State Building Codes of Ukraine).
13. DSTU B EN ISO 7730. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria]. [Valid from 2012-01-01]. Official edition. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2012. (State Building Codes of Ukraine). (in Ukrainian).
14. DSTU B EN 15251. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics]. [Valid from 2012-01-01]. Official edition. Kyiv: Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2012. (State Building Codes of Ukraine). (in Ukrainian).
15. Kononovich Y. V. Infrared heating technique. 1986, Stroyizdat, Moscow, SU. (in Russian)
16. Veronica Lucia Castaldo, Ilaria Pigliautile, Federica Rosso, Anna Laura Pisello, Franco Cotana. Investigation of the impact of subjective and physical parameters on the indoor comfort of occupants: a case study in central Italy. ScienceDirect: web-site. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217336184> (Accessed : 01 September 2020).
17. Kostantinos Gobakis, Dionysia Kolokotsa. Coupling building energy simulation software with microclimatic simulation for the evaluation of the impact of urban outdoor conditions on the energy consumption and indoor environmental quality. ScienceDirect: web-site. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817304735>
18. Braian M Beker, Camila Cervellera, Antonella De Vito, Carlos G Musso. Human Physiology in Extreme Heat and Cold. ClinMed Int. Library: URL : <https://clinmedjournals.org/articles/iacph/international-archives-of-clinical-physiology-iacph-1-001.php>

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Беликов, А. С. Охрана труда на предприятиях строительной индустрии / А. С. Беликов, А. П. Кожушко, В. В. Сафонов. – Днепропетровск : ЧП Федоренко А. А., 2010. – 528 с.
2. Грудзинский, М. М. Отопительно-вентиляционные системы зданий повышенной этажности / М. М. Грудзинский, В. Н. Ливчак, М. Я. Поз. – Москва : Стройиздат, 1982. – 256 с.
3. Губернский, Е. Д. Гигиенические основы кондиционирования микроклимата жилых и общественных зданий / Е. Д. Губернский, Е. И. Корневская. – Москва : Медицина, 1978. – 192 с.
4. Данилов М. П. Теплоустойчивость зданий в экосистеме «Окружающая среда-здание-человек» / Данилов М. П., Ветвицкий И. Л., Чесанов Л. Г., Колесник И. А. – Днепропетровск: «Поліграфіст», 2005 – 263 с.
5. Исследование влияния теплопроводных включений на параметры микроклимата помещений при отключении системы отопления / И. Л. Ветвицкий, В. Ю. Каспийцева, И. А. Колесник, А. А. Шевченко // Строительство, материаловедение, машиностроение / Приднестр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 70. – С. 65-69.
6. Исследование влияния теплопроводных включений на микроклимат помещений при аварийных ситуациях в системах теплоснабжения/ А. С. Беликов, И. А. Колесник, С. Ю. Рагимов, И. Г. Маладыка, Д. В. Вовк // Строительство, материаловедение, машиностроение / Приднестр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2017. – Вып. 98. – С. 20-24.
7. Стрежекуров Э. Е. Исследование терморadiационной напряженности в горячих цехах металлургического производства / Э. Е. Стрежекуров, С. В. Гашко // Гигиена и санитария. – 1980. – Вып. 9. – С. 62-64.
8. Табунщиков Ю. А. Строительные концепции зданий XXI века в области теплоснабжения и климатизации / Ю. А. Табунщиков // АВОК. – 2005. – № 4. – С. 4-7.
9. Борхерт Р. Техника инфракрасного нагрева / Р. Борхерт, В. Юбиц. – Ленинград: Госэнергоиздат, 1963. – 278 с.
10. Шкловер А. М. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий. – Москва: Стройиздат, 1982. – 256 с.
11. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. Общие требования : стандарт / ГОСТ 12.1.005-88; - Введ.01.01.89 // Система стандартов безопасности труда. - М. - Ч.1.-С.165-239. - М.,1996. - Изм.1 (ИУС.2000.N9).
12. ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2013. (Державні будівельні норми України). URL : <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1018>
13. ДСТУ Б EN ISO 7730 «Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту». Київ : Мінрегіон України, 2012. (Державні будівельні норми України). URL : [http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id\\_doc=28002](http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=28002)
14. ДСТУ Б EN 15251 «Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики». Київ : Мінрегіон України, 2012. (Державні будівельні норми України). URL : [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=28004](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=28004)
15. Кононович Ю. В. Тепловой режим зданий массовой застройки / Ю. В. Кононович. – М.: Стройиздат, 1986. – 158 с.
16. Veronica Lucia Castaldo, Ilaria Pigliatile, Federica Rosso, Anna Laura Pisello, Franco Cotana. Investigation of the impact of subjective and physical parameters on the indoor comfort of occupants: a case study in central Italy. ScienceDirect: web-site. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217336184> (Accessed : 01 September 2020).
17. Kostantinos Gobakis, Dionysia Kolokotsa. Coupling building energy simulation software with microclimatic simulation for the evaluation of the impact of urban outdoor conditions on the energy consumption and indoor environmental quality. ScienceDirect: web-site. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817304735>.
18. Braian M Beker, Camila Cervellera, Antonella De Vito, Carlos G Musso. Human Physiology in Extreme Heat and Cold. ClinMed International Library: web-site. URL : <https://clinmedjournals.org/articles/iacph/international-archives-of-clinical-physiology-iacph-1-001.php>

Received (Надійшла) 08.11.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.12.2023

### Determination of critical microclimate conditions and operational safety of heat supply systems during emergency heat supply shutdowns

A. Belikov, Ye. Zheleznyakov

**Abstract. Purpose:** Study of the risk of reaching critical modes of operation of heat supply systems in emergency situations, taking into account the structural features of buildings and ensuring the necessary microclimate conditions. **Methodology:** Theoretical and experimental research based on fundamental knowledge in the field of thermal processes and methods of solving heat exchange problems, methods of mathematical statistics and forecasting, modeling of changes in the temperature regime of premises during shutdowns of heating systems. **Results:** Conducted research and determination of regularities of critical microclimate conditions, obtained during field studies and theoretical-experimental studies, allow us to conclude that the obtained research results fully correspond to the determination of real microclimate conditions in rooms during emergency shutdowns of heat supply systems. At the same time, the difference between the determined predictive values of theoretical studies and natural ones does not exceed 5%, which is permissible in engineering studies. Conducted research and industrial tests allowed heat supply organizations to increase the reliability of ensuring the set minimum permissible indoor air temperature in the premises, as well as to prevent critical temperatures and increase the life time of heat supply systems, due to the introduction of a complex system of automated control and management of the microclimate parameters of the premises in emergency and shortage situations in heat supply systems. **Scientific novelty:** Establishing regularities of influence of structural features of buildings on maintenance of indoor microclimate conditions in emergency situations in heat supply systems, which allows to control the heat supply regime to ensure the necessary microclimate conditions in the premises and prevent the occurrence of critical operating conditions of heat supply systems. **Practical significance:** Improving the forecasting of the limit conditions for liquidation of the consequences of emergency situations in heat supply systems allows optimizing the activities of repair and rescue services, especially in connection with the failure of outdated heat supply systems and combat operations on the territory of the country.

**Keywords:** emergency shutdown, microclimate; external climatic conditions, structural features, critical microclimate conditions.

## МОДЕЛЬ ВУЗЛА ЕЛЕКТРОННОЇ КОМУНІКАЦІЇ, ЩО ОБСЛУГОВУЄ TCP-ТРАФІК

**Анотація.** Важливою актуальною проблемою є аналіз та оцінка ефективності функціонування вузла електронної комунікаційної мережі з урахуванням повторної передачі загублених пакетів. Реальна можливість проведення такого аналізу – побудова адекватної математичної моделі вузла. Метою завдання є відшукування ймовірностей перебування описаної системи на множині станів, знаходження ймовірності відмови системи та ймовірності ініціювання пакету, що стримує трафік. Побудовано модель вузла електронної комунікаційної мережі, яка базується на математичному апараті систем масового обслуговування. Модель враховує зберігання копій переданих пакетів до моменту отримання підтвердження про вдалу доставку, інакше вони знову ставляться у чергу обслуговування. Отримано формули розрахунку ймовірностей станів такої системи.

**Ключові слова:** електронна комунікаційна мережа, вузол, модель, система масового обслуговування.

### Вступ

Розвиток інформаційних технологій зачіпає багато галузей народного господарства, а засобом передачі даних є електронні комунікаційні мережі (ЕКМ). ЕКМ можуть використовувати різну топологію, маршрутизацію, та протоколи передачі даних. Відомі протоколи транспортного рівня TCP та UDP відрізняються тим, що TCP гарантує доставку пакету, а у разі втрати пакету, останній вузол, який зберігає його копію, змушений посилати його повторно, тим самим підвищуючи навантаження на вузол ЕКМ. Підвищення втрат пакетів підвищує трафік за рахунок повторних передач, що, у свою чергу, підвищує втрати. Очевидно, що у разі частих невдалих передач копії пакетів будуть накопичуватися, займаючи пам'ять маршрутизатора, що може призвести до ситуації, коли вузол мережі відмовлятиме в прийомі на обслуговування нових пакетів.

Інформацію про те, що пакет даних передався вдало, маршрутизатор дізнається, отримавши від вузла-приймача службовий пакет, що повідомляє про вдале пересилання, тоді копія пакета з пам'яті вилучається, звільняючи місце для пакетів, що надходять [1, 2]. У свою чергу, збільшення пам'яті маршрутизатора знижує кількість відмов, але також призводить до помітного постійного зниження швидкості роботи апарату з передачі пакетів [3].

### 1. Аналіз літератури та постановка завдання дослідження

Важливою актуальною проблемою є аналіз та оцінка ефективності функціонування вузла електронної комунікаційної мережі з урахуванням повторної передачі загублених пакетів. Реальна можливість проведення такого аналізу – побудова адекватної математичної моделі вузла ЕКМ. Найбільші результати моделювання мереж було отримано з використанням математичного апарату систем масового обслуговування [4].

Розглянемо модель вузла ЕКМ, на вхід якого надходять пакети з джерела з інтенсивністю  $\lambda_1$ . Пакети, що прибули, обслуговуються (передаються наступному вузлу за межами моделі) з інтенсивністю  $\mu_1$ , а їх копії поміщаються на зберігання у пам'яті вузла ЕКМ до підтвердження про успішну доставку (спеціальний службовий пакет). Після цього пакет із даними видаляється з пам'яті. Задамо інтенсивність видалення пакета з пам'яті у разі успішної передачі -  $\mu_2$ .

Якщо відправлений пакет не досягає адресата, його резервна копія переміщується у загальну чергу для повторної відправки.

Нехай інтенсивність появи помилок передачі одного пакета дорівнює  $\lambda_2$ .

Пам'ять вузла ЕКМ може вмістити в собі  $n$  пакетів, серед яких можуть бути як копії вже переданих пакетів, що чекають на підтвердження, так і нові, поставлені до черги на обслуговування (передачу).

Відомо, що інтервали між надходженнями пакетів на вхід вузла, їх передачею, появою помилок та видаленням успішно переданих пакетів, розподілені експонентно [5].

Тоді для аналізу системи може бути використаний математичний апарат систем масового обслуговування [6].

Побудуємо граф станів та переходів описаної системи (рис. 1).

Тут вузлу графу  $(i, j)$  відповідає стан, коли у системі зберігаються  $i$  копій різних переданих пакетів, що чекають на підтвердження про успішну доставку адресату, та  $j$  нових пакетів у черзі, що очікують передачі.

Таким чином, метою завдання є відшукування ймовірностей перебування описаної системи на множині станів, знаходження ймовірності відмови системи та ймовірності ініціювання пакету, що стримує трафік [7–9].



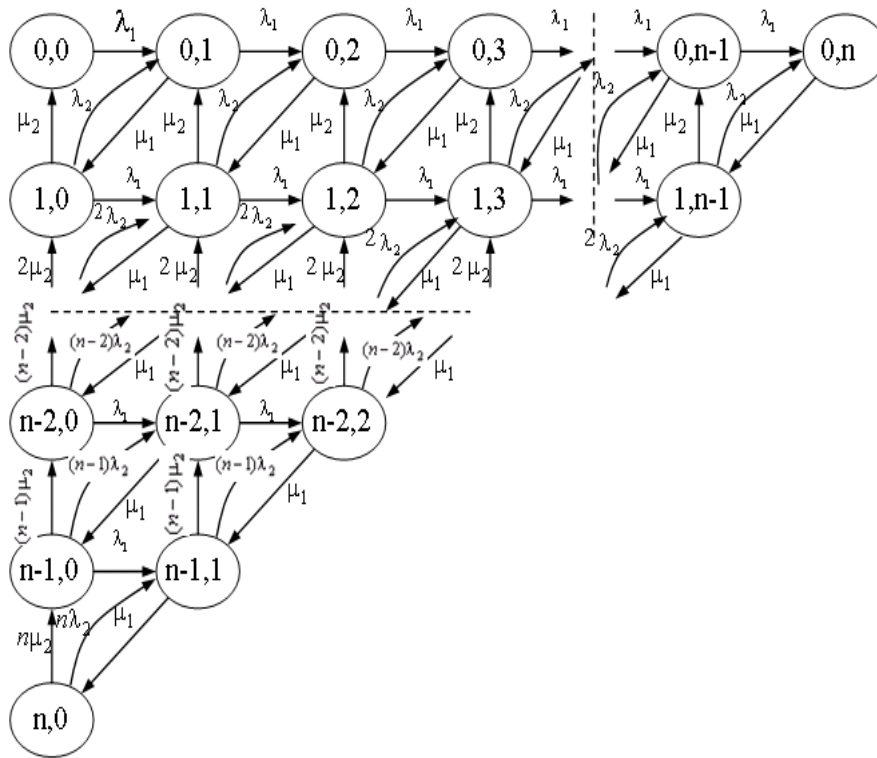


Рис. 1. Граф станів та переходів системи передачі пакетів

**2. Основні результати**

Розіб'ємо множину станів системи на підмножини в такий спосіб (рис. 2).

У групу  $E_i$  потраплять елементи, сума індексів у яких дорівнює  $i$ , наприклад,

$$E_0 = \{(0,0)\}, E_1 = \{(1,0), (0,1)\},$$

$$E_2 = \{(2,0), (1,1), (0,2)\}.$$

Складемо рівняння балансу для отриманого графа:

$$\begin{cases} \mu_{10}P_1 - \lambda_{01}P_0 = 0, \\ \mu_{21}P_2 + \lambda_{01}P_0 - (\lambda_{12} + \mu_{10})P_1 = 0, \\ \dots \\ \lambda_{n-1,n}P_{n-1} - \mu_{n,n-1}P_n = 0. \end{cases} \quad (1)$$

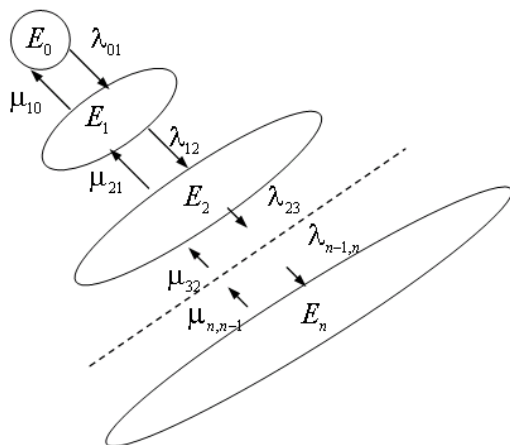


Рис. 2. Граф групованих станів та переходів

Тут  $P_k$  - ймовірність перебування системи в груповому стані  $k$ ,  $\mu_{k,k-1}$  - інтенсивність переходів з групового стану  $k$  в груповий стан  $k-1$ ,  $\lambda_{k,k+1}$  - інтенсивність переходів з групового стану  $k$  в груповий стан  $k+1$ ,  $k = 0,1,2,\dots,n$ .

Введемо  $\hat{P}_{i,k-i}$  - умовну ймовірність перебування системи в  $i$ -му стані  $k$ -го шару, за умови знаходження в цьому шарі.

Тоді ймовірності переходів між шарами дорівнюють

$$\lambda_{k,k+1} = \sum_{i=0}^k \lambda_1 \hat{P}_{i,k-i} = \lambda_1 \sum_{i=0}^k \hat{P}_{i,k-i} = \lambda_1. \quad (2)$$

$$\mu_{k,k-1} = \sum_{i=0}^k k \mu_2 \hat{P}_{i,k-i} = k \mu_2 \sum_{i=0}^k \hat{P}_{i,k-i} = k \mu_2. \quad (3)$$

Перепишемо рівняння балансу з умовою (2)-(3).

$$\begin{cases} \mu_2 P_1 - \lambda_1 P_0 = 0, \\ 2\mu_2 P_2 + \lambda_1 P_0 - (\lambda_1 + \mu_2) P_1 = 0, \\ 3\mu_3 P_3 + \lambda_1 P_1 - (\lambda_1 + 2\mu_2) P_2 = 0, \\ \dots \\ \lambda_1 P_{n-1} - n\mu_2 P_n = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Введемо  $z_k = k\mu_2 P_k - \lambda_1 P_{k-1}$ .

Виконавши підстановку  $z_k$  в (4), отримаємо

$$\begin{cases} z_1 = 0, \\ z_2 - z_1 = 0, \\ z_3 - z_2 = 0, \\ \dots\dots\dots \\ z_n = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Звідси знаходимо

$$z_k = k\mu_2 P_k - \lambda_1 P_{k-1} = 0. \quad (6)$$

Використовуючи (6), виразимо ймовірність станів системи через  $P_0$ .

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{\lambda_1}{\mu_2} P_0, \\ P_2 &= \frac{\lambda_1}{2\mu_2} P_1 = \frac{\lambda_1}{2\mu_2} \frac{\lambda_1}{\mu_2} P_0 = \\ &= \frac{\lambda_1^2}{2\mu_2^2} P_0; \\ P_3 &= \frac{\lambda_1}{3\mu_2} P_2 = \frac{\lambda_1}{3\mu_2} \frac{\lambda_1}{2\mu_2} \frac{\lambda_1}{\mu_2} P_0 = \\ &= \frac{\lambda_1^3}{3!\mu_2^3} P_0; \\ &\dots\dots\dots \\ P_k &= \frac{\lambda_1}{k\mu_2} P_{k-1} = \frac{\lambda_1^k}{k!\mu_2^k} P_0, \quad k = 1, 2, \dots, n. \end{aligned}$$

Введемо  $\rho = \frac{\lambda_1}{\mu_2}$ , приведену інтенсивність потоку, що надходить.

За умови нормування  $\sum_{i=0}^n P_i = 1$  отримаємо

$$P_0 + \rho P_0 + \frac{\rho^2}{2!} P_0 + \frac{\rho^3}{3!} P_0 + \dots + \frac{\rho^n}{n!} P_0 = 1,$$

$$P_0 \left( 1 + \rho + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} + \dots + \frac{\rho^n}{n!} \right) = 1.$$

Оскільки з фізичних міркувань зрозуміло, що  $\lambda_1 < \mu_2$  [хх], то для достатньо великого  $n$  маємо

$$1 + \rho + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} + \dots + \frac{\rho^n}{n!} \approx e^\rho.$$

Тоді

$$P_0 \approx e^{-\rho}.$$

При цьому

$$P_k = \frac{e^{-\rho} \rho^k}{k!},$$

$$k = 0, 1, \dots, n. \quad (7)$$

Таким чином, знайдені ймовірності групових станів системи. Знайдемо тепер розподіл ймовірностей станів усередині кожного шару.

Розглянемо граф станів та переходів для  $k$ -го шару (рис. 3).

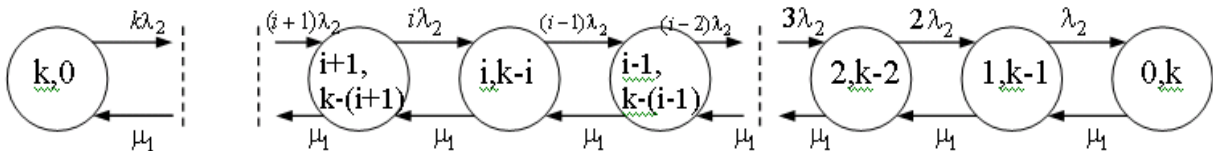


Рис. 3. Граф станів і переходів для  $k$ -го шару

Складемо рівняння балансу для розглядаємої мережі:

$$\begin{cases} \lambda_2 \hat{P}_{1,k-1} - \mu_1 \hat{P}_{0,k} = 0, \\ 2\lambda_2 \hat{P}_{2,k-2} + \mu_1 \hat{P}_{0,k} - \lambda_2 \hat{P}_{1,k-1} - \\ \quad - \mu_1 \hat{P}_{1,k-1} = 0, \\ \dots\dots\dots \\ (i+1)\lambda_2 \hat{P}_{i+1,k-(i+1)} + \mu_1 \hat{P}_{i-1,k-(i-1)} - \\ \quad - i\lambda_2 \hat{P}_{i,k-i} - \mu_1 \hat{P}_{i,k-i} = 0, \\ \dots\dots\dots \\ k\lambda_2 \hat{P}_{k,0} - \mu_1 \hat{P}_{k-1,1} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Виконаємо підстановку змінних

$$Z_i = i\lambda_2 \hat{P}_{i,k-i} - \mu_1 \hat{P}_{i-1,k-(i-1)},$$

яка систему (8) приводить до вигляду

$$\begin{cases} Z_1 = 0, \\ Z_2 - Z_1 = 0, \\ Z_3 - Z_2 = 0, \\ \dots\dots\dots \\ Z_k = 0. \end{cases}$$

Звідси випливає, що  $Z_i = 0, i = 1, \dots, k$

і, отже,  $i\lambda_2 \hat{P}_{i,k-i} - \mu_1 \hat{P}_{i-1,k-(i-1)} = 0$ .

Тоді 
$$\hat{P}_{1,k-1} = \frac{\mu_1}{\lambda_2} \hat{P}_{0,k},$$

$$\hat{P}_{2,k-2} = \frac{\mu_1}{2\lambda_2} \hat{P}_{1,k-1} = \frac{\mu_1}{2\lambda_2} \frac{\mu_1}{\lambda_2} \hat{P}_{0,k} = \frac{\mu_1^2}{2!\lambda_2^2} \hat{P}_{0,k};$$

.....

$$\hat{P}_{i,k-i} = \frac{\mu_1}{i\lambda_2} \hat{P}_{i-1,k-(i-1)} = \frac{\mu_1^i}{i!\lambda_2^i} \hat{P}_{0,k};$$

$$i = 1, 2, \dots, k.$$

Введемо  $\alpha = \frac{\mu_1}{\lambda_2}$ . З умови нормування

$$\sum_{i=0}^k \hat{P}_{i,k-i} = 1 \text{ отримаємо}$$

$$\hat{P}_{0,k} + \frac{\alpha}{1!} \hat{P}_{0,k} + \frac{\alpha^2}{2!} \hat{P}_{0,k} + \frac{\alpha^3}{3!} \hat{P}_{0,k} + \dots + \frac{\alpha^k}{k!} \hat{P}_{0,k} = 1,$$

$$\hat{P}_{0,k} \left( 1 + \frac{\alpha}{1!} + \frac{\alpha^2}{2!} + \frac{\alpha^3}{3!} + \dots + \frac{\alpha^k}{k!} \right) = 1.$$

Аналогічно попередньому, маємо

$$\hat{P}_{0,k} = e^{-\alpha}.$$

При цьому

$$\hat{P}_{i,k-i} = \frac{e^{-\alpha} \alpha^i}{i!}, \quad i = 1, 2, \dots, k.$$

Таким чином, знайдено умовну ймовірність перебування системи в стані  $(i, k-i)$  за умови перебування в  $k$  шарі.

Тоді безумовна ймовірність знаходження системи може  $(i, j)$  дорівнює

$$P_{i,j} = P_{(i+j)} \times \hat{P}_{i,j} = \frac{\rho^{i+j} \alpha^i}{(i+j)!} e^{-(\rho+\alpha)}.$$

## Висновок

Таким чином, було отримано співвідношення для розрахунку ймовірностей перебування системи на множині станів.

Тоді ймовірність відмови розраховується як ймовірності перебування системи у  $n$  шарі

$$P_{\text{від}} = \sum_{i+j=n} P_{i,j} = \frac{\rho^n}{n!} e^{-(\rho+\alpha)} \sum_{i=0}^n \frac{\alpha^i}{i!} = \frac{\rho^n}{n!} e^{-\rho},$$

а ймовірність викидання вузлом ЕКМ стримуемого пакета [10] дорівнює ймовірності перебування системи в груповому стані, номер якого обчислюється як найменше ціле, яке більше ніж  $\lceil 0.8 * n \rceil$ . Корисно було б запровадити критерій, що визначає середню кількість переданих пакетів в одиницю часу

$$\eta = m(\lambda_1, n)(1 - P_{\text{омк}}(\lambda_1, \mu_2, n)),$$

де  $m(\lambda_1, n)$  - умовна середня кількість пакетів, які вузол потенційно готовий передати за умови відсутності відмови.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. K. Yesmar. TCP/IP and Ethernet Quick Reference Guide: From the OSI Model to port definitions, packet structure and subnetting. 2022. 547p.
2. Larry L Peterson, Lawrence Brakmo, Bruce S Davie. TCP Congestion Control: A Systems Approach. 2022. 138 p.
3. Kamoun, F., Outay, F.: IP/MPLS networks with hardened pipes: service concepts, traffic engineering and design considerations. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2018. pp. 1-8.
4. Dimitris Bertsimas, David Gamarnik. Queueing Theory: Classical and Modern Methods. 2022. 586p.
5. Ibrahim Hussein, S.A., Zaki, F.W., Ashour, M.M.: Performance evaluation of software-defined wide area network based on queueing theory. IET Netw. 11(3-4), 128–145 (2022). <https://doi.org/10.1049/ntw2.12039>
6. Harchol-Balter, M. The multiserver job queueing model. *Queueing Syst* 100, 201–203 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11134-022-09762-x>
7. Yang, S., Xu, C., Zhong, L., Shen, J., Muntean, G. M. (2019), "A QoE-Driven Multicast Strategy With Segment Routing—A Novel Multimedia Traffic Engineering Paradigm", IEEE Transactions on Broadcasting, No. 66(1), P. 34-46. DOI: <https://doi.org/10.1109/TBC.2019.2932338>
8. Petrovska, I. and Kuchuk, H. (2022), "Static allocation method in a cloud environment with a service model IAAS", *Advanced Information Systems*, vol. 6, is. 3, pp. 99–106, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.3.13>.
9. Ткачов В. М., Коваленко А. А., Кучук Г. А., Ні Я. С. Метод забезпечення живучості високомобільної комп'ютерної мережі. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Том 5, № 2. С. 159-165. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.22>
10. Stallings, W. (2015), *Foundations of modern networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud*, Addison-Wesley Professional, 560 p.

Received (Надійшла) 25.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.11.2023

## Model of an electronic communication node handling TCP traffic

V. Voronets, P. Pustovoitov

**Abstract.** An important current problem is the analysis and evaluation of the efficiency of the functioning of the node of the electronic communication network, taking into account the retransmission of lost packets. The real possibility of conducting such an analysis is the construction of an adequate mathematical model of the node. The goal of the task is to find the probabilities of the described system being in multiple states, to find the probability of system failure and the probability of initiating a traffic-blocking packet. It was developed the network node model based on the mathematical tools of the queueing theory. A model takes into account the storage of sent packages copies until the moment of successful delivery confirmation receiving; otherwise they are again enqueued on service. The formulas to estimate the probabilities of system states are got.

**Keywords:** electronic communication network, node, model, mass service system.

A. Kapiton, R. Talybov, O. Dziuban, B. Kanivets

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

## ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINING THE QUALITY OF FUNCTIONING OF TELECOMMUNICATION SYSTEMS

**Abstract.** The rapid development and spread of information and communication technologies is taking on the character of a global information revolution today. Users have a need for communication services that can be flexibly configured. Next Generation Networks (NGN) - the modern stage of development of telecommunication networks (TCN) - represent a single transport platform on the basis of which various types of services are combined. One of the main aspects that should be taken into account when designing NGN is the provision of appropriate quality of service. With the introduction of multi-service networks, the approach to the task of service level based on the requirements of the users themselves for the quality of services becomes predominant, which requires the improvement of methods of managing the quality of services in TCN. The analysis of the works of domestic and foreign scientists regarding service quality management in TCN indicates the need to improve service quality management methods. It should be noted that in the works on the quality management of telecommunication services (TCS), attention is mainly paid to the technical indicators of the quality of services, while the development of effective methods of taking into account the user's opinion in managing the quality of services is currently relevant. The existing subjective methods of assessing the quality of TCS take into account the quality of the transmitted media information based on expert assessments, but do not provide a full assessment of the quality of the service by the user. The ITU-T recommendations describe different points of view on the quality of service, but do not provide specific methods for evaluating and managing the quality of TCS taking into account the opinion of the user. It is the unsolved task of comprehensive assessment of the quality of services in next-generation TCN that determined the purpose of this work.

**Key words:** network, service, internet, protocol, control, session, quality of service, user interface.

### Introduction

Currently, global networks (Wide Area Networks, WAN) are used to provide information and communication services to a large number of end subscribers scattered over a large area - within a region, state, continent or the entire globe. Considering the long length of the communication channels, it is necessary to provide the necessary bandwidth of the channel, constant support in working condition of hardware and software nodes of the network, which are scattered over a large area. The main requirement for networks is to provide users with access to the resources of all computers connected to the network [1].

Research and analysis of the state and constant monitoring of telecommunication networks is an urgent task. Telecommunications monitoring is: observation, selection based on certain characteristics, processing and registration of a communication session in telecommunications networks using the telecommunications network monitoring system [1].

At the monitoring stage, the procedure for collecting primary data on the operation of the network is performed: statistics on the number of packets of various protocols circulating in the network, on the state of ports of hubs, switches and routers, etc.

According to the state of the primary parameters of the telecommunications network, the above-mentioned parameters of the network are determined. Let's call the current state of the telecommunications network the set of current parameters of the telecommunications network measured in a given time interval. Thus, under the monitoring of the telecommunications network we will understand the collection and recording of the current state of the telecommunications network in a given time interval. Let's call the normal state of the

telecommunication network the set of parameters of the telecommunication network, which are established by the regulation of its operation in a given time interval.

Thus, under the analysis of the telecommunications network we will understand the process of comparing the current and normal states of the telecommunications network in a given time interval.

By the result of the analysis, we will understand the set of recorded values of discrepancies between the current and normal state of the telecommunications network for each parameter. The task of analysis requires more active human participation and the use of such complex tools as expert systems that accumulate the practical experience of many network specialists.

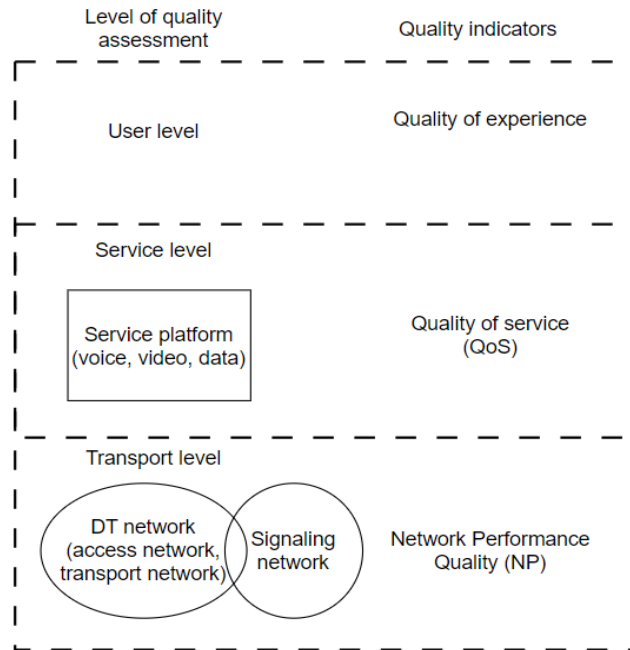
The received information about the operation of the telecommunications network can be analyzed with varying degrees of depth or detail.

**Analysis of recent research and publications.** The relevance of the study of this issue is confirmed by the analysis of the works of scientific workers and the opinions highlighted in these works in magazines, collections of reports of conferences held in our country and abroad. In this connection Khlaponin Y., Zhyrov G. investigate the problems of monitoring of telecommunication networks based on intelligent technologies [1]. In the research work Mozhaiev M., Peresichansky V., Roh V., Bellorin-Herrera O. consider method of analysis of quality indicators of computer network of information system of critical application [2]. Tykhvinsky V. pays attention to Management and quality of services in GPRS/UMTS [3]. Also, the focus of scientific research is the analysis of issues principles of architecture of intelligent networks [4]. A number of works by domestic and foreign scientists are devoted to the study of the ITU-T Recommendation [5].

**Main part**

One of the most urgent issues in the provision of communication services is the issue of service quality. A high level of quality is important both for the user and for the service provider, while it is important to guarantee the quality of the services provided, when the user has the opportunity to choose the level of service he needs, and the service provider undertakes to provide this level. Authors such as P. Ferguson, R. Huston addressed issues of service quality for all services supported by the NGN network. Regulation of heterogeneous traffic flows was considered by the following authors: Ya. Wang, S. Patek, E. Liebeherr.

Quality issues are considered in ITU-T recommendations [2]. Quality assessment in the next generation network is carried out at three levels: – at the user level, indicators of a person's subjective judgment are assessed, for example, a subjective assessment of the quality of perception of a particular type of information; – at the level of services, various aspects of service quality are evaluated, such as data transfer speed, coding mechanisms and much more; – at the transport level, the quality of network functioning is evaluated: delays, losses, delay variation, etc. In the work of Tykhvinsky a three-level quality assessment model and the corresponding assessment parameters are given (Fig. 1) [3].



**Fig. 1.** Three-level quality assessment model

The MCE-T model is sufficient, covers all planes and network components of NGN. It not only includes ETSI TISPAN solutions, but also complements them. However, the works of MCE-T are of a general nature, so the use of this model in practice is complicated.

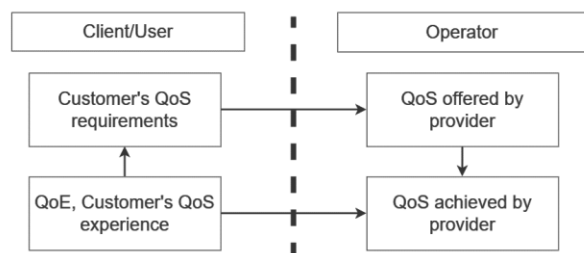
Therefore, it is necessary to improve the methods of managing the quality of services using ITU-T recommendations and to develop specific procedures for the implementation of the process of ensuring the quality of services in next-generation telecommunication networks, taking into account the opinions of users.

One of the main aspects that should be taken into account when designing NGN networks is ensuring the quality of service. The issue of ensuring the quality of communication services is relevant, and currently about 12 large international organizations are dealing with this issue, including: ITU-T, ETSI, 3GPP, DSL Forum, CableLab, etc. [4].

Quality of service (QoS) is a set of characteristics of a telecommunications service related to its ability to satisfy established and anticipated needs of the user regarding the service (the definition is borrowed from the ISO 8402 standard). For a comprehensive

assessment of QoS, it is necessary to consider both the level of QoS planned and actually achieved by the service provider, and the subjective assessment of QoS by the user.

QoS management can be explained by applying four perspectives on QoS. These views cover all aspects of QoS - from the point of view of the provider and the user (or client) of the service. The four views of QoS are: customer QoS requirements; QoS offered by the operator (or planned / targeted QoS); QoS achieved (provided) by the operator; customer perception of QoS (QoS evaluations based on survey results). (Fig. 2) shows the relationship between the user's and the operator's points of view on the quality of services [5].



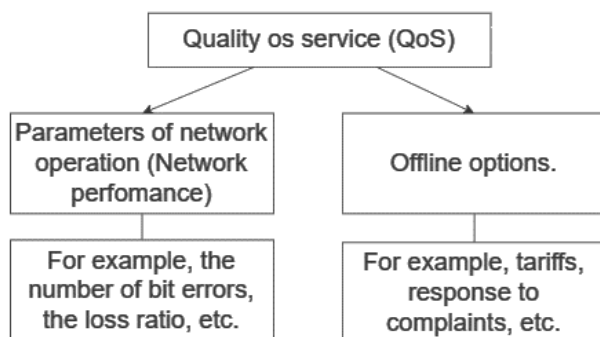
**Fig. 2.** Point of view on the quality of services

The quality of perception (Quality-of-experience, QoE) is the acceptability of the service or program as a whole, which is subjectively perceived by the end user. The quality of perception takes into account the influence of all aspects and participants of the service provision (user, terminal, network, etc.). The acceptability of the service may depend on the user's expectations.

Parameters affecting the quality of service perception:

- network efficiency ratio (NER);
- delay in providing the service;
- quality of provided media information (MOS / R-factor).

Customer's QoS requirements determine the level of service quality required by customers. The criteria and parameters that determined this level are reflected in the requirements. QoS offered by the operator (QoS offered by provider) is a list of clearly defined requirements that can be used: as a basis for forming SLA (Service Level Agreement); for the operator to declare the level of quality available to users; as a basis for planning and maintaining the service at a given level; as a basis for users when choosing an operator that provides the most acceptable level of service quality. QoS achieved by the operator (QoS achieved by provider) is the level of service quality actually provided by the operator. It can be used: by customers, the regulator as a basis for comparing the level of service quality offered by the operator and actually provided, and checking the fulfillment of the SLA; operator as a basis for corrections. QoS perceived by the client (QoE, Customer's QoS experience) is the quality of services perceived by the client and expressed in the form of an assessment. It is based on customer surveys and characterizes the customer's opinion regarding the quality of the services received. These data can be used for: comparison with the proposed level of service quality and determining the reasons for deviations; planning corrections. When determining the quality criteria of a telecommunications service, it is necessary to take into account these various views. (Fig. 3) shows the relationship between Quality of Service and Network Performance [5].



**Fig. 3.** Relationship between Quality of Service and Network Performance

Parameters of network performance (NP) - the network's ability to provide functionality that ensures user interaction: IPTD - information transmission delay,

IPDV - delay deviation, IPLR - proportion of information loss, IPER - proportion of errors. Based on the analysis of the state of the issue, it can be concluded that MCE-T presented the most complete description of the concept of service quality, taking into account different points of view, but did not provide specific ways of calculating and forming a comprehensive assessment of service quality. Let's consider the developed methods of taking into account subjective quality indicators when forming a QoS assessment.

The rapid development and spread of communication technologies is taking on the character of a global information revolution today. Subscribers have a need for communication services that can be flexibly configured according to their requirements. This requires the development of evaluation methods and effective consideration of the user's opinion regarding the quality of services. Satisfying user requirements includes both technical (network performance parameters) and non-technical (user service) aspects. The analysis of scientific and technical literature shows that the development of telecommunication technologies exacerbates the problem of ensuring high quality of services, presenting ever-increasing demands on various aspects of their functioning. The urgency of improving and developing new methods of assessing the quality of telecommunication services is also due to the need to form a comprehensive assessment of the quality of services, which takes into account the contribution of all participants in the process of creating and providing the service. To date, various models have been developed for evaluating and managing the quality of services, which mainly take into account the technical indicators of the quality of the telecommunications network. To evaluate subjective indicators, MOS scores are used, which, however, also do not give a complete picture of service quality.

Despite the large number of works in the field of managing the quality of telecommunication services, the question of taking into account the opinion of users in managing the quality of services remains unresolved. When developing methods of managing the quality of services, it is rational to use a systematic approach: the problem of quality assurance should not be solved in isolation, but in the unity of relations with the environment - by the user. The existing methods of taking into account subjective quality indicators were analyzed and the methods of fuzzy logic and neural networks were chosen.

On the basis of the chosen methods, existing approaches and recommendations, it is necessary to develop a method of taking into account the opinion of users when managing the quality of services. At the same time, the contribution of various parties - participants in the process of creating and providing the service should be taken into account, and indicators should be grouped depending on which of the parties is responsible for their provision. The completeness of the assessment is ensured by the formation of a set of quality indicators, which should characterize the degree of satisfaction with all or most of the properties of the

services intended for the user. To select the quality indicators of a certain service, it is necessary to assess the impact of these indicators on the degree of user satisfaction with the quality of the service. At the same time, it is necessary to avoid the redundancy of the system - there should be no more than 4-6 indicators in each group. To assess the degree of user satisfaction with the quality of services, it is necessary to define sub-criteria that take into account the participation of all parties in the process of creating and providing services. When forming the degree of user satisfaction with the quality of services, the significance or "weight" of each of the quality indicators should be taken into account.

The possibility of forecasting network development needs should be considered based on a comparison of the current level of user satisfaction with the quality of services and the required value. To evaluate the effectiveness of the developed methods, simulation models should be developed.

QoS parameters are user-oriented and refer to the service as a whole, while network performance parameters may or may not be end-to-end. Although QoS parameters and network performance characteristics differ in essence and serve different purposes, it is clear that there is an internal relationship between them, some have a direct or indirect, and sometimes even inverse effect on the other. Based on the fact that QoS is a measure of "the degree of user satisfaction with the service", it is possible to assume that ideally subjective measurement methods should be used to determine the quality of service. However, subjective measurement is a complex and time-consuming process.

Objective measurements of network performance parameters can be used to identify and analyze specific QoS problems associated with network operation. The

QoS measurement policy should take into account the parameters affecting the resulting quality of service between a number of aspects of the communication network architecture [1-5].

Thus, to obtain a complete picture of QoS, both methods should be considered - objective and subjective. Objective measurements are performed in case of determination of network performance parameters and other QoS parameters, which can be presented in quantitative form.

Subjective measurements are performed in the case of subjective aspects, and are also subjected to numerical expression of parameters, if the customer's perception of the quality that they think they receive is determined.

## Conclusions

The principles of building telecommunication networks of the next generation have been studied. It is shown that the rapid development of information and communication technologies causes an expansion of the range of services provided.

On the basis of the conducted study of existing methods of taking into account the opinion of users regarding the quality of services in NGN, the necessity of developing methods that allow determining the level of quality of telecommunication services from the point of view of users is shown.

Based on the analysis of existing methods of evaluating and managing the quality of services in next-generation networks, the need to improve existing and develop new methods and approaches to managing the quality of telecommunication services, which must take into account both the technical characteristics of the network and the opinion of users regarding the quality of services, is shown.

## REFERENCES

1. Khlaponin Y., Zhyrov G. Analysis and Monitoring of Telecommunication Networks Based on Intelligent Technologies / XVI International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Security" (ITS 2016) URL: <https://ceur-ws.org/Vol-1813/paper5.pdf>.
2. Mozhaiev M., Peresichansky V., Roh V., Bellorin-Herrera O. (2023). METHOD OF ANALYSIS OF QUALITY INDICATORS OF COMPUTER NETWORK OF INFORMATION SYSTEM OF CRITICAL APPLICATION. Control, Navigation and Communication Systems. 2023. No. 1. doi: 10.26906/SUNZ.2023.118
3. Tykhvinsky V.O. Management and quality of services in GPRS/UMTS networks: tutorial. Manual [Text] / V.O. Tykhvinskyi, S.V. Terentyev - M.: Eco-Trendz, 2007. 395 p.
4. Principles of architecture of intelligent network: ITU-T. I.312 / Q.1201. Geneva, 1992. 33 c.
5. ITU-T Recommendation E.802 – Framework and methodologies for the determination and application of QoS parameters, Geneva, 2007.

Received (Надійшла) 5.10.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.11.2023

## Аналіз методів визначення якості функціонування телекомунікаційних систем

А. Капітон, Р. Талибов, О. Дзюбан, Б. Канівець

**Анотація.** У статті розглядається принципи побудови телекомунікаційних мереж наступного покоління. Показано, що стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій зумовлює розширення спектру послуг, що надаються. На основі проведеного дослідження існуючих методів врахування думки користувачів щодо якості послуг показано необхідність розробки методів, які дозволяють визначити рівень якості телекомунікаційних послуг з точки зору користувачів. На основі аналізу існуючих методів оцінки та управління якістю послуг у мережах нового покоління виявлено необхідність удосконалення існуючих та розробки нових методів і підходів до управління якістю телекомунікаційних послуг, які повинні враховувати як технічні характеристики мережі так і думку користувачів щодо якості послуг.

**Ключові слова:** мережа, послуга, інтернет, протокол, керування, сеанс, якість обслуговування.

Л. О. Нікітіна, Н. В. Дженюк

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

## ІМЕРСИВНЕ НАВЧАННЯ СТУДЕНТІВ У ГАЛУЗІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**Анотація.** Сучасний освітній процес може бути кардинально змінений із застосуванням технологій імерсивного навчання – віртуальної, доповненої та змішаної реальності. При підготовці спеціалістів з телекомунікацій та радіотехніки можливість накладати мультимедійні об'єкти на реальний світ для перегляду через пристрої з інтернет-підтримкою, такі як телефони та планшети, персональні комп'ютери означає, що інформація може бути доступна студентам у цілодобово і в потрібному місці. Це потенційно може зменшити перевантаження студентів при вивченні навчальних дисциплін, надаючи їм найбільш сприятливі умови і темп засвоєння матеріалу. У даному документі розглядаються переваги імерсивного навчання та специфіка використання імерсивних технологій в освітньому процесі. На завершення наводиться погляд на майбутні дослідження у галузі створення навчальних ресурсів з використанням технологій імерсивного навчання.

**Ключові слова:** імерсивне навчання; віртуальна реальність; VR доповнена реальність; AR; змішана реальність; MR; телекомунікації.

### Вступ

Випробування для галузі української освіти, які постали через епідемію COVID-19, були багатократно примножені війною. Широкомасштабне вторгнення Росії на територію України у лютому 2022 року стало причиною масштабних та серйозних проблем в українській освіті. Внаслідок воєнних дій частина студентів України була вимушена переміститися до інших місць проживання, значна кількість закладів освіти зазнала пошкоджень та руйнувань. Керівництво закладів освіти вимушено було прийняти рішення про перехід на дистанційну форму навчання [1]. Але виклики, які постали перед освітянами через епідемію COVID-19 та війну, стрімко прискорили перебіг природних тенденцій розвитку системи вищої освіти щодо оптимізації та корекції навчального процесу. Передусім ідеться про розвиток цифрової та дистанційної освіти, зокрема онлайнної, та впровадження нових інформаційних технологій та імерсивного навчання.

Протягом багатьох років освітяни намагаються застосовувати різноманітні технології, щоб залучити студентів, викликати інтерес до навчання, покращити розуміння тем, що викладаються у навчальних дисциплінах. Останнім часом зростає увага до застосування у навчанні імерсивних технологій, таких як віртуальна реальність (VR), доповнена реальність (AR), змішана реальність (MR) [2, 3]. Ці технології дозволяють втілити у тривимірному просторі ідеї матеріалу, що викладається, а це дає можливість студентам краще зрозуміти та засвоїти матеріал.

Використання потенціалу можливостей технологій VR, AR, MR допоможе візуалізувати абстрактні теоретичні концепції навчальних дисциплін з галузі інженерії телекомунікацій і покращити якість теоретичного навчання студентів, отримання ними практичних навичок та компетентностей, передбачених стандартом та освітньою програмою. Застосування наявних форм інформаційно-комунікаційних технологій та передових технологій імерсивного навчання на різних рівнях навчального процесу дозволить вирішити завдання, що постали перед системою освіти України через пандемію COVID-19 і агресію РФ.

Дана стаття присвячена висвітленню питань застосування технологій імерсивного навчання інженерів з телекомунікацій.

### 1 Поняття імерсивного навчання. Технології імерсивного навчання

Питанням імерсивного навчання присвячено багато публікацій з прикладами застосування у різних сферах освіти. Імерсивне навчання – це навчання з ефектом занурення, методика навчання на основі досвіду, яка використовує реальність (VR, AR, MR) для моделювання сценаріїв реального світу та навчання студентів у безпечному та захоплюючому навчальному середовищі. Використання штучного середовища, максимально наближеного до справжнього життя, дозволяє не тільки усунути зовнішні відволікаючі фактори, але й позбутися одноманітності в процесі навчання, забезпечуючи стимулюючу візуалізацію [4-15]. Завдяки технологіям імерсивного навчання студенти можуть контролювати свої результати, пов'язуючи їх з реальним досвідом, управляти віртуальним світом, у якому вони перебувають. Технології імерсивного навчання дозволяють відтворити віртуально будь-яке фізичне середовище, до якого не було доступу в стінах аудиторії [2, 16]. Технології, що використовуються в імерсивному навчанні [5, 8]:

- 1) віртуальна реальність;
- 2) доповнена реальність;
- 3) змішана реальність;
- 4) 3D-імерсивне навчання.

**Віртуальна реальність (VR)** використовує цифрове моделювання для відтворення реальних сценаріїв. Користувач, використовуючи гарнітуру, занурюється у віртуальний світ і може досліджувати його компоненти. VR вимагає повного занурення у віртуальне середовище, тобто, у заздалегідь змодельований світ і часткового (в перспективі – повне) ізолювання його від світу фізичного. Для цього використовуються шоломи віртуальної реальності й інші спеціальні пристрої. Розробники прагнуть імітувати взаємодію зі створюваною ними псевдореальністю шляхом впливу на всі наявні у людини органи чуття.



**Доповнена реальність (AR)** в режимі реально-го часу доповнює реальне середовище цифровими компонентами, що забезпечується комп'ютерними пристроями (смартфонами, планшетами та окулярами AR). Відбувається проектування певної цифрової інформації (зображення, відео, текст, графіка і т.д.) на екрані цифрового пристрою. Реальний світ доповнюється штучними елементами і новою інформацією. Використовується середовище реального світу, поверх якого накладається певна частина віртуального середовища, наприклад графічні зображення, звуки та реакція на дотики. AR може бути реалізована за допомогою додатків для звичайних смартфонів і планшетів, окулярів доповненої реальності, стаціонарних екранів, проєкційних пристроїв та інших технологій [11, 13].

**Змішана реальність (MR)** виконує поєднання доповненої реальності та віртуальної реальності (рис. 1), робить віртуальні взаємодії більш реалістич-

ними, дозволяє цифровим та фізичним об'єктам співіснувати та взаємодіяти в режимі реального часу. Виконується накладання неіснуючих віртуальних об'єктів на навколишній світ. проектування тривимірних віртуальних об'єктів або голограм на фізичний простір. Дозволяє переміщатись навколо віртуального об'єкту, оглядати його з усіх боків і, за необхідності, всередині. Вимагає, як правило, спеціального обладнання (окулярів або шоломів). Віртуальні образи привносяться у фізичний простір, візуалізуються і розташовуються, відповідно предметів реальності так, щоб вони сприймалися як реально існуючі. Людина продовжує взаємодіяти з фізичним світом, у якому, в той же час, присутні віртуальні об'єкти, іноді майже неможливо відрізнити від реальних [10-15].

3D-імерсивне навчання (3D) сприяє поглибленому навчанню та використовує 3D-візуалізації та симуляції, щоб забезпечити користувачам отримання певного досвіду.

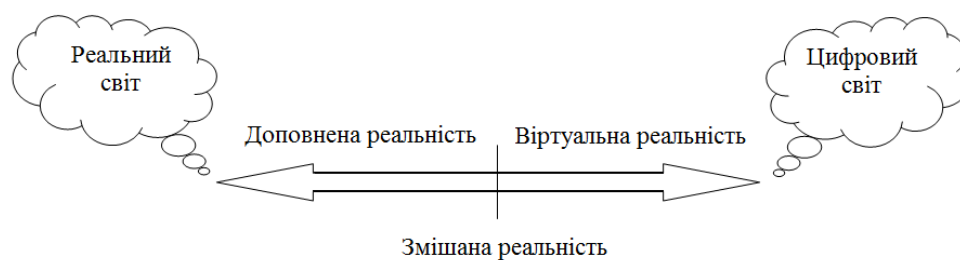


Рис. 1. Співвідношення AR, VR і MR

Впровадження імерсивного навчання дозволить надати студентам нові навички та розширити їхню базу знань. Наведемо переваги імерсивного навчання.

1. Покращення навчання через виконання: процес навчання є динамічним, він здійснюється на основі практики, студент навчається, як реагувати в реальних життєвих сценаріях.

2. Забезпечення середовища навчання без відволікань: імерсивне навчання забезпечує середовище без відволікань (зовнішнє середовище блокується частково або повністю), студенти можуть повністю зосередитися на завданні.

3. Повторення практичних дій з подальшим аналізом результатів: надає досвід і допомагає зробити його досконалим. Це особливо важливо для практичного навчання, оскільки допомагає розвинути м'язову пам'ять і вдосконалити конкретні техніки, де помилки в реальному світі можуть бути катастрофічними.

4. Наближення навчання до реального життя: технології занурення пробуджують інтерес до навчання, покращують розуміння навколишнього світу.

5. Імерсивне навчання орієнтоване на користувача навчання, його можна персоналізувати: підібрати найкращий темп навчання, підлаштувати під кожного студента хід процесу навчання.

6. Студенти можуть отримувати досвід та знання під керівництвом викладача у режимі реального часу: це дає можливість негайно отримувати зворотний зв'язок у ході навчання.

7. Навчання є безпечним: відтворення реальних ситуацій в цифровому просторі відбувається у без-

печному та безризиковому середовищі, студенти мають можливість проведення досліджень та навчання на зроблених помилках.

## 2. Особливості підготовки спеціалістів зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка»

Підготовка висококваліфікованого, конкурентоспроможного, інтегрованого у світовий простір фахівця в галузі телекомунікацій та радіотехніки орієнтована на формування компетентного фахівця. Такий фахівець має мати високий рівень теоретичної та практичної професійної підготовки, вміти критично аналізувати та оцінювати стан телекомунікаційних систем та мереж, бути спроможним вирішувати наявні проблеми та знаходити нові рішення в сфері телекомунікацій та радіотехніки, інформаційно-комунікаційних систем. Важливим аспектом діяльності такого фахівця є здатність розробляти і реалізовувати проекти у сфері телекомунікацій та здійснювати власні дослідження.

Згідно вимог освітнього законодавства України всі здобувачі вищої освіти мають нагоду сформувати індивідуальну освітню траєкторію, тобто, персональний шлях реалізації особистісного та професійного потенціалу здобувача вищої освіти. Освітня траєкторія є шляхом розвитку здібностей, особистісних якостей і психічних процесів студента. Вона має на меті забезпечити максимально сприятливі умови для навчання й розвитку кожного студента.

У освітній програмі зі спеціальності 172 – «Телекомунікації та радіотехніка» НТУ «ХПІ» маємо дві

основні освітні траєкторії, які тісно переплітаються, – траєкторію телекомунікацій та радіотехніки і траєкторію інформаційних комп'ютерних технологій. Кожен студент має можливість сформувати індивідуальну траєкторію навчання, найкращу для його особистих цілей та вподобань.

Для підготовки спеціалістів зі спеціальності “Телекомунікації та радіотехніка” студентам викладають принципи побудови і функціонування сучасних телекомунікаційних дротових і бездротових комп'ютерних мереж, мереж мобільного зв'язку різних поколінь, фіксованого і мобільного інтернету, супутникового зв'язку. Студенти отримують знання стосовно принципів функціонування та побудови телекомунікаційних, інфокомунікаційних систем, систем передачі та комутації. Студенти вивчають дисципліни, пов'язані з програмуванням на різних платформах, організацією та зберіганням даних, захистом інформації, застосуванням сучасних інформаційних технологій в інфокомунікаційних системах [1-19].

Теоретичний зміст предметної області телекомунікацій та радіотехніки охоплює концепції, принципи, поняття, стандарти, моделі та методи побудови і функціонування телекомунікаційних, радіотехнічних та інфокомунікаційних пристроїв, систем, комплексів, технологій та їхніх компонентів. Теоретичні знання студенти застосовують для побудови телекомунікаційних систем, аналізу стану телекомунікаційного обладнання, технічного обслуговування та вдосконалення телекомунікаційних систем [19-21].

Імерсивний освітній ресурс є засобом залучення суб'єкта, що навчається, у середовище, яке визначається змістом та контекстом навчальної дисципліни. Імерсивність можна визначити як властивість технологічної частини середовища, що забезпечує психологічний стан людини, в якому його власне «Я» сприймає себе включеним в процес і взаємодіє із середовищем, що забезпечує йому безперервний потік стимулів і досвіду [2].

Імерсивні технології у підготовці спеціалістів з телекомунікацій можуть знайти застосування як при викладанні дисциплін теоретичної, так і практичної підготовки.

При вивченні у середовищі VR прикладних питань навчальних дисциплін, таких як телекомунікаційні системи та мережі, системи передачі інформації, комп'ютерні системи та мережі та ін., студенти можуть вибрати режим отримання знань – 1) вивчення внутрішньої структури окремих компонентів обладнання ТКС з використанням тривимірної візуалізації цих об'єктів, 2) зовнішніх характеристик компонентів та специфіки їхньої взаємодії з іншими об'єктами системи, 3) компонування системи з наявних компонентів згідно з заявленою конфігурацією з можливістю переміщення у віртуальному просторі, 4) перевірки працездатності та тестування побудованої системи. Кожен студент може сам вибрати темп та послідовність режимів навчання. У результаті такого навчання кожен студент найкращим чином отримує емпіричні знання, з візуалізацією

завдань та розумінням цілей. Такий імерсивний навчальний ресурс, розміщений у хмарі, є доступний учасникам навчання цілодобово у будь-якому місці за наявності відповідних комунікацій. Учасники навчання можуть знаходити рішення спеціально створених навчальних проблемних ситуацій. Студенти стають більше залученими до змісту навчальної дисципліни, мають змогу безпечно багатократно повторювати свої експерименти, не боячись щось зламати або пошкодити.

Особливою рисою підготовки інженерів з телекомунікацій є те, що вони мають вміння виконувати розробку як телекомунікаційних систем як таких, так і їхніх компонентів. З використанням імерсивних технологій студенти можуть ставати дизайнерами, наприклад, з доповненою реальністю. Такий підхід створення об'єктів у віртуальному середовищі допомагає розвивати мислення вищого рівня і покращує результати навчання. Окрім покращення концептуального розуміння, навчання на основі віртуальної розробки та експериментування має призвести до покращення мотивації студентів продовжувати кар'єру в галузі практики з телекомунікацій. Якість знань студентів можна підвищити шляхом обговорення, вирішення проблем, теоретизування та вироблення висновків [21].

Імерсивні навчальні ресурси при вивченні теоретичних аспектів дисциплін можуть надавати студентам інтерактивні моделі, об'єкти комп'ютерної графіки (діаграми, графіки, карти, таблиці), інтерактивні схеми, фотографії, відеофрагменти, аудіофрагменти, компоненти 3D анімації. Для кожної теми навчальної дисципліни необхідно визначити придатність застосування технологій імерсивного навчання.

Навчання з ефектом занурення базується на моделюванні, навчанні на основі ігор, технологіях реальності та 360-градусних відео [10]. Названі вище технології реальності, включаючи віртуальну реальність, доповнену реальність і змішану реальність, мають дозволити студентам зануритися в змодельоване середовище та відчувти взаємодію між фізичними та віртуальними об'єктами [14]. VR має повністю занурити студентів у віртуальний світ, дозволяючи відчувти надзвичайно реалістичне середовище, за допомогою візуальних, слухових, інтерактивних та інших елементів сенсорної стимуляції. Користувачі VR взаємодіють лише у віртуальному світі. AR спроможна доповнювати віртуальними об'єктами реальне середовище. Користувачі сприймають цифровий контент, створений обчислювальними пристроями, як засіб для взаємодії з фізичним світом. MR надає можливість оцінювати навколишнє середовище у тривимірному форматі. Згодом цифрові об'єкти, створені технологіями MR, можуть бути реалізовані у фізичному світі. Це показує, що AR-технології можуть ефективно допомагати процесу навчання складних теорій і концепцій за допомогою візуалізації об'єктів. Однак технології доповненої реальності не можуть аналізувати 3D-середовище для реалізації цифрових об'єктів, і, отже, технології MR повинні використовуватися далі для технологічної освіти.

Побудова навчального ресурсу у галузі телекомунікацій з використанням технологій AR, VR, MR може складатися з наступних кроків.

1. Визначення мети, цілей та завдань теми, що вивчається.

2. Аналіз ідеї створення ресурсу, перевірка здійсненності та життєздатності ідеї.

3. Виконання підбору технологій та засобів для створення ресурсів. Перевірка функціональних можливостей вибраного забезпечення. Дослідження часових та фінансових витрат на розробку.

4. Створення бази візуальних зображень об'єктів, які будуть використовуватися.

5. Створення базової версії ресурсу для перевірки його основних функцій.

6. Доповнення додатку новим вмістом VR, MR.

Програмні ресурси VR, AR, MR для навчального середовища у хмарі [6] можуть бути побудовані за загальною архітектурою (рис. 2).



Рис. 2. Загальна архітектура програмного ресурсу для імерсивного навчання

У моделюванні контенту використовують механізми 3D-моделювання відповідно до вимог програми. Для ефективної імітації віртуальних об'єктів і розміщення в реальності використовують дані про контекст користувача та середовище. Наприклад, завдяки використанню хмарних служб, таких як керування вмістом, репозиторій, обробка зображень і веб-сервіси, установки та набори інструментів додатків реальності ефективно використовуються для створення 3D-візуалізації. Для візуалізації 3D-вмісту інструменти розробки веб-сайтів можуть скомпілювати пакет програмного забезпечення для пристроїв VR/AR/MR і емуляторів для відтворення.

Критично важливим елементом у створенні навчального ресурсу з телекомунікацій відіграє викладач як дизайнер, розробник та помічник. У багатьох випадках можуть виникати проблеми, якщо викладачі недостатньо оснащені чи навчені для ефективного вирішення технічних проблем і проблем, які можуть виникнути, коли технологія реальності функціонує неналежним чином. Викладачі потребують постійної та ефективної підтримки спеціалістів для розробки та використання навчальних ресурсів з імерсивними технологіями.

Викладачі повинні мати глибокі знання в тематичній області та здатність сприяти створенню сере-

довища для спільного навчання. Крім того, викладачі мають мати бажання та здатність вибирати з широкого спектру педагогічних підходів, щоб дозволити студентам переходити від досвіду до більш концептуальних та аналітичних форм.

Впровадження імерсивного навчання для підготовки спеціалістів у галузі телекомунікації ті радіотехніки є актуальним, але складним питанням. Імерсивне навчання має багато переваг, але не є вільним від недоліків. Існують обмеження використання технологій імерсивного навчання: 1) технічні аспекти застосування навчальних ресурсів (наприклад, для використання AR-системи необхідно застосування технології GPS, програмного забезпечення з розпізнавання образів, систем аудіо програвання, доступу до Інтернету, засобів маніпулювання віртуальними об'єктами та взаємодії з ними [6]); 2) висока вартість впровадження і експлуатації рішень в сфері доповненої і віртуальної реальності; 3) нестача спеціалізованого контенту і недосконалість пристроїв (контент має відповідати цілому набору вимог, в тому числі науковій достовірності, його можуть запропонувати далеко не всі розробники); 4) можливий негативний вплив на здоров'я, психоемоційне напруження [2]. Значимою проблемою є і відсутність єдиної методології [11].

### 3. Засоби для створення ресурсів імерсивного навчання

Процес розробки проектів, що включають інноваційні технології AR, VR, MR, є складним. При розробці проекту з нуля витрачається дуже багато зусиль, адже існує багато аспектів, які слід враховувати та розглядати.

Однією з найбільш популярних для створення 3D-проектів платформою є Unity 3D. Вона пропонує розробникам повний інструмент розробки віртуальної реальності з великим сховищем активів 2D і 3D шаблонів дизайну для легкого імпорту.

Для розробки проектів, призначених для імерсивного навчання, потрібні відповідні інструменти [22]. Дану проблему можна вирішити, застосовуючи SDK. SDK (від англ. software Development Kit) — набір із засобів розробки, утиліт і документації, який дозволяє програмістам створювати прикладні програми за визначеною технологією або для певної платформи (програмної або програмно-апаратної). Такі засоби дозволяють розробникам застосовувати типові та перевірені часом рішення та шаблони при розробці. Роль AR/VR SDK полягає у виконанні нетривіального завдання злиття цифрового вмісту та інформації з реальним світом.

Твої надає широкий спектр можливостей від розробки прототипів сюжету та макетів до формування додатків AR, VR, MR або створення повномасштабної анімації. Передбачає командну роботу над додатком та спрощує обмін творами з членами команди, які працюють над проектами VR. Цей інструмент має велику бібліотеку реквізитів, простих форм і ефектів, які можна додати до своїх проектів. Є можливість імпортувати 3D-моделі, відео, звуки та зображення до своїх прототипів. Це програмне

забезпечення дозволяє користувачам експортувати свої роботи як відео, фотографії, досвід віртуальної реальності та 3D-анімовані моделі.

Vuforia – це SDK доповненої реальності, що пропонує ряд продуктів для розробки AR-додатків, включаючи Vuforia Engine, Studio та Chalk. Програмне забезпечення підтримує створення як маркерної, так і безмаркерної AR та має кілька ключових функцій, які роблять її однією з найкращих для розпізнавання об'єктів та 3D-моделювання. Ці функції включають Ground Plane (для додавання вмісту до горизонтальних поверхонь), Visual Camera (розширює підтримувані візуальні джерела, крім мобільних телефонів і планшетів), і VuMarks (власні маркери, які можна використовувати в розпізнаванні обличчя Vuforia, а також кодувати дані).

ShapesXR – це інструмент для створення віртуальної реальності та спільної роботи від Tvoі. Ця програма призначена для створення просторового контенту допомагає розробникам створювати 3D-розкадровки, потоки користувачів і програми, що захоплюють прототипи, у середовищі VR.

Користувачі можуть використовувати потужні можливості інструменту для створення MR для розробки пристроїв AR, додатків VR та інтерактивних середовищ. Користувачі можуть створювати контент за допомогою шаблонів ShapesXR або завантажувати в додаток свої 3D-моделі у форматі .obj.

ARKit (від Apple) – це програмне забезпечення для розробки AR-додатків, яке неможливо використовувати на телефонах Android. Програмне забезпечення спирається на дані датчиків камери та додаткові дані (наприклад, з гіроскопа та акселерометра) з метою виявлення та аналізу оточення користувачів для візуалізації AR. ARKit підтримує швидке відстеження руху, відстеження обличчя, швидкий перегляд (відображення моделей та сцен, які можна легко переміщати та масштабувати) та різні ефекти візуалізації.

ARCore (від Google) призначено для виконання AR-розробок для платформи Android (смартфонів, планшетів). ARCore надає користувачеві функції для AR - відстеження руху, виявлення поверхні для розуміння довкілля, оцінка освітленості. Є безкоштовним для розробників та підтримує цілий ряд смартфонів та планшетів із підтримкою Android і iOS.

Gravity Sketch – це 3D-платформа, яка допомагає міждисциплінарним командам співпрацювати та ефективно створювати продукти VR. Користувачі отримують доступ до різноманітних цифрових інструментів від розробки концептуальних ескізів до детальних 3D-моделей.

ARToolKit – це SDK з відкритим кодом та безкоштовним для використання, доступним для розробки AR для пристроїв на різних платформах. Окрім Android та iOS, ARToolKit використовується для додатків AR у Windows, Linux та OS X. ARToolKit постачається з декількома додатковими плагінами для розробки за допомогою Unity та OpenSceneGraph.

MAXST AR SDK – це крос-платформний механізм AR, який надає всі функції та середовища для розробки AR-програм. Забезпечує крос-платформний

механізм AR, забезпечуючи розробника усіма функціями для створення AR-додатків. Розробка AR-додатків на платформі MAXST є порівняно швидкою та простою.

Spark AR Studio – це платформа доповненої реальності для Mac і Windows від Facebook, яка дозволяє з легкістю створювати AR-ефекти для мобільних камер, створення анімованих масок, ігор та ефектів для Instagram. Користувач може створювати відео або анімувати фото, накладаючи на зображення власні динамічні маски.

Wikitude – підходить для розробки AR-додатків для пристроїв iOS, Android та Smart Glasses. Підтримує різноманітні методи та технології відстеження, включає геолокацію, розпізнавання хмар та функції масштабування елементів доповненої реальності відносно відстані до різних поверхонь чи об'єктів.

Вищезазначені програми є популярними серед розробників. Кожна з них має свої сильні та слабкі сторони, які в основному складаються з підтримуваних та непідтримуваних функцій та платформ. Для того, щоб створити свій AR-додаток, слід обирати інструменти, які найкраще відповідатимуть вимогам та вподобанням розробників проектів імерсивного навчання.

#### 4. Обладнання для імерсивного навчання

Важливим питанням при впровадженні імерсивних технологій у навчальний процес є апаратне забезпечення. У існуючих реаліях студенти можуть навчатися в аудиторіях або онлайн. Залежно від бюджету навчального закладу та ситуації можна 1) створити на кафедрі віртуальну лабораторію з телекомунікаційної інженерії для навчання офлайн; 2) використовувати власні пристрої студентів та викладачів при навчанні онлайн.

Пристрої для застосування VR, AR, MR можна розділити на наступні групи: мобільні пристрої, стаціонарні пристрої, спеціальні засоби [23].

**Пристрої AR.** Мобільні пристрої - планшети, смартфони, окуляри доповненої реальності, лінзи доповненої реальності. На планшети і смартфони має бути встановлено спеціалізоване ПЗ - браузері доповненої реальності, такі як Wikitude, Layar, Vlipar, City Lens для Windows Phone.

Окуляри доповненої реальності мають функцію проектування голограм та інформації у реальний простір без прив'язки їх до їх фізичних об'єктів. Вони являють собою екран перед очима. Найбільш відомими є окуляри Google Glass, Vuzix Blade, Epson Moverio, Sony SmartEyeglass.

Окуляри Microsoft HoloLens, Magic Leap One и Meta 2 призначені для змішаної реальності, вони дозволяють працювати з віртуальними об'єктами, прив'язаними до реального світу. Лінзи для доповненої реальності поки ще лишаються технологією майбутнього. Метою розробників є перетворення лінзи у прозорий екран, що містить систему управління, мініатюрну камеру, антену, світлодіоди та інші оптоелектронні компоненти.

2. Стаціонарні пристрої - телевізор, екран комп'ютера, ігровий комп'ютер. На екран телевізора

виводиться доповнене зображення. Іноді використовуються широкоформатні екрани, а також проєкційні системи, здатні накладати зображення не лише на екрани, але і на будь-які поверхні.

3. Спеціальні засоби - спеціалізовані шоломи, на скло яких виводиться необхідна графічна та текстова інформація і користувач може сприймати її, не переводячи погляд на інші об'єкти. Сенсори, розташовані у шоломі, сліdkують за поворотом голови користувача чи рухом очних яблук. Такі шоломи є дуже дорогими.

**Пристрої VR.** Розробники систем VR приділяють найбільшу увагу пристроям, що забезпечують формування зображень, оскільки 80% інформації людина отримує через зір. Сучасні розробники ведуть роботи над пристроями з тактильних відчуттів і навіть імітації запахів.

1. Шоломи віртуальної реальності містять один або кілька дисплеїв, на які виводяться зображення для лівого і правого ока, систему лінз для коригування геометрії зображення, систему трекінгу, що відстежує орієнтацію пристрою в просторі. За зовнішнім виглядом вони тепер схожі на окуляри, тому їх все часто називають VR-гарнітурами або окулярами VR. Шоломи є основним компонентом VR з повним зануренням, оскільки не тільки забезпечують об'ємне зображення і стереозвук, але ще і частково ізолюють користувача від навколишньої реальності.

Їх можна розділити на три групи:

- окуляри, в яких обробку і виведення зображення забезпечує смартфон (Android, iPhone, Windows Phone); сучасні смартфони здатні самостійно обробляти тривимірні зображення; дисплеї смартфонів мають досить високу роздільну здатність; практично кожен смартфон забезпечений датчиками, що дозволяють визначати положення пристрою в просторі;

- окуляри, в яких обробку зображення забезпечує зовнішня пристрій (ПК, Xbox, PlayStation тощо); зовнішня пристрій має бути високопродуктивним, а окуляри – забезпечені датчиками положення;

- автономні окуляри віртуальної реальності (Lenovo Mirage Solo, спільно з Google, Oculus Quest від Facebook, Samsung Gear VR тощо).

2. Motion Parallax 3D-дисплеї використовують властивий людині механізм сприйняття обсягу – паралакс. Для користувача в кожен момент часу генерується відповідна проєкція тривимірного об'єкту, виходячи з його положення щодо екрану. Переміщаючись навколо сцени, користувач може оглянути її з усіх боків, при цьому всі об'єкти сцени переміщуються одна відносно іншої. Явище паралакса багаторазово підсилює сприйняття обсягу. Технологія Motion Parallax 3D дозволяє користувачеві розглянути 3D-сцену з усіх боків, і виникає ілюзія, ніби все її об'єкти є реальними. Система, що використовує механізм паралакса, вловлює найдрібніші рухи голови користувача і відстежує їх з високою швидкістю і точністю, так що мозок не фіксує спотворення геометрії об'єктів, викликані запізненням зміни зображення.

Ці пристрої, як правило, забезпечують неповне занурення, оскільки відтворюються на дисплеях і не ізолюють користувача від навколишнього середовища. Виняток — кімнати віртуальної реальності

(CAVE, cave automatic virtual environment). У таких кімнатах на кожен стіну проєктується стереоскопічне зображення, розраховане для конкретної точки, в якій і знаходиться користувач. У підсумку таке зображення оточує людину з усіх боків, занурює його в себе. Деякі експерти вважають, що VR-кімнати набагато краще VR-шоломів: забезпечують більш високу роздільну здатність, немає необхідності надягати на голову громіздкий пристрій, в якому деяких навіть заколисують, і самоідентифікація відбувається простіше завдяки тому, що користувач має можливість постійно бачити себе.

3. Пристрої для відтворення звуку реалізуються як багатоканальні акустичні системи. Вони дозволяють виробляти розташування джерела звуку у сцені, завдяки чому користувач може орієнтуватися в віртуальному світі за допомогою слуху.

4. Тактильні та інші відчуття створюються за допомогою рукавичок та костюмів віртуальної реальності, які мають датчики, що дозволяють відслідковувати рух зап'ясть і пальців рук або всього тіла. Технічно це може бути реалізовано різними методами: з використанням оптоволоконних кабелів, тензометричних або п'єзоелектричних датчиків, а також електромеханічних пристроїв (такі як потенціометри). Костюми віртуальної реальності відслідковують зміну положення всього тіла користувача і передають тактильні, температурні і вібраційні відчуття, а в комбінації з шоломом – зорові і слухові.

5. Пристрої управління використовуються для взаємодії з віртуальним середовищем. Це спеціальні джойстики (геймпади, wands), що містять вбудовані датчики положення і руху, а також кнопки і колеса прокрутки, як у миші. Зараз такі джойстики все частіше роблять неспровідними. У якості пристроїв управління можуть також використовуватися згадані вище інформаційні рукавички і костюми віртуальної реальності.

З наведеного огляду апаратних засобів видно, що вартість обладнання, що може використовуватися у навчальному процесі, варіюється і може бути дуже високою. Тому при виборі технології для створення імерсивного навчального ресурсу необхідно проаналізувати не тільки особливості навчальної дисципліни, але й технічні можливості кафедри, студентів та можливі форми проведення занять.

## Висновки

У даній статті розглянуто питання застосування технологій імерсивного для навчання інженерів у галузі телекомунікацій та радіо електроніки. Аналіз публікацій дозволив зробити висновок про актуальність створення електронних навчальних ресурсів з використанням технологій VR, AR, MR, оскільки це дозволить підвищити якість надання освітніх послуг і підготувати висококваліфікованих та конкурентоздатних спеціалістів у галузі телекомунікацій та радіотехніки. У наступних публікаціях ми плануємо представляти розвиток цієї теми з точки зору підходів до створення імерсивних навчальних ресурсів у галузі телекомунікацій та радіотехніки та висвітлювати отримані результати.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ОСВІТНЯ АНАЛІТИКА КРИЗЬ ПРИЗМУ ВІЙНИ: ВИКЛИКИ ТА МОЖЛИВОСТІ ДЛЯ ВИЩОЇ ШКОЛИ УКРАЇНИ. / ЕКОНОМІКА ТА СУСПІЛЬСТВО. Випуск # 39 / 2022.
2. Соколюк О.М. Імерсивність в сучасних освітніх середовищах / Соколюк О. М. // Імерсивні технології в освіті: збірник матеріалів І Науково-практичної конференції з міжнародною участю. – Київ : ІТЗН НАПН України, 2021. – С. 143-148.
3. Гриценчук О.О. Перспективи впровадження імерсивних технологій в освіту: досвід Нідерландів. «Імерсивні технології в освіті»: збірник матеріалів І Науковопрактичної конференції з міжнародною участю. / Київ : ІТЗН НАПН України, 2021. с. 84-88.
4. Ekerin Olyseye Michael, Heidi Tan Yeen-Ju, Neo Tse Kian. Exploring the Use of Immersive Technology in Education to Bring Abstract Theoretical Concepts to Life. / International Journal of Vreative Multimedia. Vol1, Special Issue No 1 (2020).
5. Immersive Technology Applications in Education. [https://www.researchgate.net/publication/308815964\\_Application\\_of\\_immersive\\_technologies\\_for\\_education\\_State\\_of\\_the\\_art/link/58d0524da6fdcc344b0c0db0/download](https://www.researchgate.net/publication/308815964_Application_of_immersive_technologies_for_education_State_of_the_art/link/58d0524da6fdcc344b0c0db0/download)
6. Immersive Learning Design for Technology Education: A Soft Systems Methodology <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2021.745295/full#:~:text=Immersive%20Learning%20for%20the%20Technology%20Education&text=Its%20primary%20characteristic%20is%20that,objects%20to%20the%20real%20environment.>
7. AVR For Education. <http://eonreality.com/wp-content/uploads/2020/06/8.2-Augmented-Virtual-Reality-for-Telco-Providers.pdf>
8. An Introduction to Immersive Technologies <https://www.vistaequitypartners.com/insights/an-introduction-to-immersive-technologies/>
9. Волинець В.О. Віртуальна, доповнена і змішана реальність: сутність понять та специфіка відповідних комп'ютерних систем. Питання культурології, (37), 231-243, 2021. doi: <https://doi.org/10.31866/2410-1311.37.2021.237322>.
10. Maas, M. J., and Hughes, J. M. (2020). Virtual, augmented and mixed reality in education: A review of the literature. Technol. Pedagog. Educ. 29, 231–249. doi: 10.1080/1475939X.2020.1737210
11. Bower M. Augmented Reality in education – cases, places and potentials. Educational Media International. 2014. 51(1). DOI:10.1080/09523987.2014.889400.
12. Yi Tan 1,2 , Wenyu Xu 1,2, Shenghan Li 1,2 and Keyu Chen. Augmented and Virtual Reality (AR/VR) for Education and Training in the AEC Industry: A Systematic Review of Research and Applications
13. Mekacher, L., (2019). Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR): The Future of Interactive Vocational Education and Training for People with Handicap. PUPIL: International Journal of Teaching, Education and Learning, 3(1),
14. Brigham, T. J. (2017). Reality check: basics of augmented, virtual, and mixed reality. Med. Ref. Serv. Q. 36, 171–178. doi: 10.1080/02763869.2017.1293987
15. Jerry, T. F. L., & Aaron, C. C. E. (2010). The impact of augmented reality software with inquiry-based learning on students' learning of kinematics graph. In Proceedings of the 2 nd International Conference on Education Technology and Computer (pp. V2-1–V2-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICETC.2010.5529447>
16. Гончарова Н. ТЕХНОЛОГІЯ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ В ПІДРУЧНИКАХ НОВОГО ПОКОЛІННЯ. <https://lib.iitta.gov.ua/716685/1/9c8b6a35b1ea5b7130c1ae9942824e97.pdf>
17. Ekerin Oluseye , M., Tan Yeen-Ju, H. ., & Neo , T. K. (2020). Exploring the Use of Immersive Technology in Education to Bring Abstract Theoretical Concepts to Life. *International Journal of Creative Multimedia*, 1(SI 1), 71–81. <https://doi.org/10.33093/ijcm.2020.X1.7>
18. Virtual Reality Technologies for Future Telecommunications Systems. <https://www.wiley.com/en-us/Virtual+Reality+Technologies+for+Future+Telecommunications+Systems-p-9780470848869>
19. Hidenobu Nagata1, Dan Mikami, Hiromu Miyashita, Keigo Wakayama, Hideaki Takada. Virtual Reality Technologies in Telecommunication Services. Journal of Information Processing Vol.25 142–152 (Feb. 2017).
20. The role of immersive technologies in the telecom industry <https://insidetelecom.com/the-role-of-immersive-technologies-in-the-telecoms-industry/>
21. Using Immersive Virtual Reality in Field Service Telecom Engineers Training [https://www.researchgate.net/publication/352439204\\_Using\\_Immersive\\_Virtual\\_Reality\\_in\\_Field\\_Service\\_Telecom\\_Engineers\\_Training](https://www.researchgate.net/publication/352439204_Using_Immersive_Virtual_Reality_in_Field_Service_Telecom_Engineers_Training)
22. Технології і концепції Industry 4.0 <https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation>
23. Top 20 AR/VR Design Tools and Resources For Building Immersive Applications. <https://www.circuitstream.com/blog/top-20-ar-vr-design-tools-and-resources-for-building-immersive-applications>

Received (Надійшла) 6.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.11.2023

**Immersive education of students in the field of telecommunications**

L. Nikitina, N. Dzheniuk

**Abstract.** The modern educational process can be radically changed with the use of immersive learning technologies - virtual, augmented and mixed reality. In the training of telecommunications and radio engineering specialists, the ability to overlay multimedia objects on the real world for viewing through Internet-enabled devices such as phones and tablets, personal computers means that information can be available to students around the clock and at the right time. place This can potentially reduce the overload of students when studying academic disciplines, providing them with the most favorable conditions and pace of learning the material. This document examines the advantages of immersive learning and the specifics of using immersive technologies in the educational process. In conclusion, a look at future research in the field of creating educational resources using immersive learning technologies is provided.

**Keywords:** immersive learning; virtual reality; VR augmented reality; AR; mixed reality; MR; telecommunications.

В. М. Почерняєв<sup>1</sup>, М. С. Магомедова<sup>2</sup>, Н. М. Сивкова<sup>1</sup>, О. В. Шефер<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Національна академія Служби безпеки України, Київ, Україна

<sup>2</sup> Київський фаховий коледж зв'язку, Київ, Україна

<sup>3</sup> Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Україна

## КУТОВИЙ РОЗНЕСЕНИЙ ПРИЙОМ НА ЛІНІЯХ ТРОПОСФЕРНОГО ТА ІОНОСФЕРНОГО ЗВ'ЯЗКУ

**Анотація.** В роботі оцінено ефективність кутового рознесення сигналів на тропосферних та іоносферних лініях через визначення оптимального кута рознесення та енергетичного виграшу від кутового рознесення. Записано залежність потужності на вході приймача від азимутального кута при азимутальному кутовому рознесенні. Отримано коефіцієнт кореляції огинаючої сигналу при кутовому рознесенні по азимуту. Знайдено енергетичний виграш при кутовому рознесенні при орієнтації діаграми спрямованості вздовж напрямку радіохвиль на трасі. Надано наближену формулу для ймовірності помилки при четвертному прийомі. Представлено формулу енергетичного виграшу при переході від подвійного просторово-рознесенного прийому до четвертного прийому з кутовим рознесенням. Знайдено максимальний енергетичний виграш при оптимальному куті в порівнянні з подвійним просторово-рознесенним прийомом. Оцінено оптимальні кути рознесення при різних діаграмах спрямованості антен.

**Ключові слова:** кутовий рознесений прийом, просторово-рознесений прийом, тропосферний зв'язок, іоносферний зв'язок, коефіцієнт кореляції, енергетичний виграш.

### Вступ

Завмирання на лініях тропосферного та іоносферного зв'язку впливають на ймовірність помилки при прийомі сигналів [1]. Одним із способів отримання некорельованих завмирань при рознесеному прийомі на радіолініях з використанням іоносферного розсіювання метрових хвиль та тропосферного розсіювання сантиметрових хвиль може бути кутове рознесення діаграм спрямованості приймальної антени в горизонтальній площині.

Кутове рознесення не є повноцінною заміною просторового рознесення антен, оскільки при великих кутах рознесення, необхідних для отримання некорельованих завмирань, зменшується абсолютний рівень розсіяного сигналу. Видається необхідним визначити оптимальний кут рознесення, при якому

кутове рознесення забезпечує максимальний виграш по відношенню до одинарного прийому, а також оцінити ефективність кутового рознесення в порівнянні з просторово-рознесенним прийомом.

За наявності двох антен, рознесених у просторі, кутове рознесення можна здійснити на кожній з них і, в результаті, отримати четвертний прийом (подвійний просторово-рознесений прийом у поєднанні з кутовим рознесенним прийомом). Такий прийом при використанні кутового рознесення має перевагу в порівнянні з подвійним просторово-рознесенним прийомом, але поступається за ефективністю четвертному просторо-рознесеному прийому.

При кутовому рознесеному прийомі кожна з діаграм антени «вирізає» у просторі свій обсяг перевипромінювання (рис. 1), де 1, 2, 3, 4 – об'єми перевипромінювання.

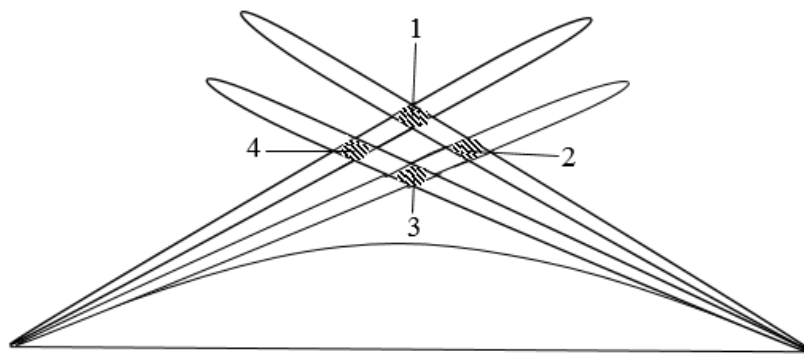


Рис. 1. Обсяги перевипромінювання, які відповідають двухпроменевому кутовому рознесенню сигналів

Якщо рознесення між діаграмами спрямованості досить великий, ці обсяги виявляються ізольованими один від одного. Взаємне розташування та вид неоднорідностей діелектричної проникності повітря в ізольованих обсягах будуть різними. Тому сигнали можуть бути достатньо некорельованими і кутовий рознесений прийом буде ефективним за умови, що середнє значення амплітуд цих сигналів не будуть сильно відрізнятися. Інакше ефективність рознесеного прийому різко

знижується. Остання умова накладає обмеження на величину кутового рознесення. Справа в тому, що рівень сигналу при дальньому тропосферному розповсюдженню радіохвиль залежить від спрямованості прийому. У головному напрямку спостерігається максимум сигналу і при відхиленні від головного напрямку рівень сигналу різко падає. Це призводить до того, що кутовий рознесений прийом виявляється ефективним лише за використанням гостронаправлених антен та є доціль-

ним для впровадження в комбінованих телекомунікаційних системах, наприклад, в мобільних цифрових тропосферно-іоносферних та мобільних цифрових тропосферно-радіорелейних станціях [2-6].

**Аналіз літературних джерел.** Техніка рознесення прийому широко використовується у радіозв'язку. Найбільшого поширення набув просторово-рознесений прийом, який застосовується в системах МІМО [7, 8], під час передачі сигналів OFDM [9], у системах міліметрового діапазону хвиль [10], у системах зв'язку різного призначення [11–13]. Кутовий рознесений прийом використовується в системах МІМО [14], у сенсорних мережах зв'язку [15], на високошвидкісних лініях зв'язку [16–18]. Зазначимо, що поляризаційне рознесення сигналів використовується як у мережах радіозв'язку [19], так і у радіолокації [20].

**Мета роботи** – оцінити ефективність кутового рознесення сигналів на тропосферних та іоносферних лініях через визначення оптимального кута рознесення та енергетичного вирашу від кутового рознесення.

### Основна частина

При азимутальному кутовому рознесенні залежність потужності на вході приймача  $P_{\text{прм}}$  від азимутального кута  $\beta$  можна записати у вигляді:

$$P_{\text{прм}} = A(\beta)G_{\text{прд}}G_{\text{прм}}, \quad (1)$$

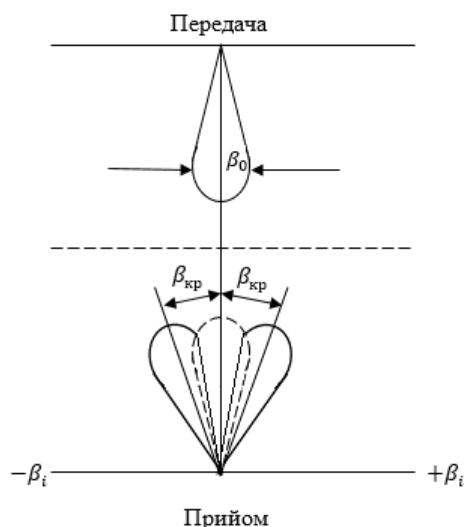
де  $A(\beta)$  – множник, що характеризує спрямовані властивості розсіювального середовища;  $G_{\text{прд}}$ ,  $G_{\text{прм}}$  – коефіцієнти спрямованої дії передавальної та приймальної антен відповідно.

Формули для визначення величин, що входять до (1) наступні:

$$A(\beta) = e^{-\beta^2}, \quad (2)$$

$$G_{\text{прд}} = G_{\text{прм}} = e^{-\alpha^2\beta^2}. \quad (3)$$

На практиці, найчастіше, має місце випадок, коли обидві діаграми спрямованості приймальної антени зрушені симетрично, щодо напрямку поширення радіохвиль на трасі, як показано на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема розташування передавальної та приймальної діаграм спрямованості при кутовому рознесенні сигналів

Тоді, коефіцієнт  $\alpha$  у формулі (1) має вигляд:

$$\alpha^2 = e/(\beta_0)^2, \quad (4)$$

де  $\beta_0$  – ширина діаграми спрямованості у горизонтальній площині.

Коефіцієнт кореляції миттєвих значень напруги сигналу при кутовому рознесенні відповідно до роботи [21] може бути записаний таким чином:

$$r(\beta_{\text{кр}}) = \exp[-\beta_{\text{кр}}\alpha^2(1 - \alpha^2/\rho^2)], \quad (5)$$

де величина  $\rho^2 = 2\alpha^2 + 1$ .

Будемо вважати, що огинаюча сигналу на лініях тропосферного та іоносферного зв'язку розподілена за законом Релея і коефіцієнт кореляції огинаючого сигналу може бути представлений у вигляді:

$$R(\beta_{\text{кр}}) \approx [r(\beta_{\text{кр}})]^2. \quad (6)$$

З урахуванням (4), (5), (6) отримаємо коефіцієнт кореляції огинаючої сигналу при кутовому рознесенні по азимуту в наступному явному вигляді:

$$R(\beta_{\text{кр}}) = \exp\left\{-\beta_{\text{кр}}^2 \frac{e^2}{(2\beta)^2} \left[\frac{1 + \frac{e}{(2\beta)^2}}{1 + 2\frac{e}{(2\beta)^2}}\right]\right\}. \quad (7)$$

Формула (7) показує, що кореляція визначається не тільки кутовим рознесенням, але і відношенням ширини діаграми спрямованості антен до ширини кутового енергетичного спектру розсіяних тропосферою хвиль. Слід зазначити, що з виведення формул не враховувалася ширина діаграми спрямованості антени, що передає. Однак відомо [21], що при збільшенні розміру розкриття антени, що передає, звужується кутовий енергетичний спектр. Якщо це взяти до уваги, то у формулі (7) величину  $\frac{1}{\rho^2}$  слід замінити на величину

$$\frac{1}{\rho^2} + \frac{1}{\beta_{\text{прд}}^2},$$

де  $\beta_{\text{прд}}$  – ширина діаграми спрямованості передавальної антени.

Якщо взяти відношення потужності сигналу  $\sigma$  при кутовому рознесенні сигналу при  $\beta_{\text{кр}} = 0$ , то величина  $\sigma$  збігається з коефіцієнтом кореляції миттєвих значень сигналу:

$$\delta = \frac{P_{\text{кр}}}{P_0} = \exp[-\beta_{\text{кр}}^2\alpha^2(1 - \alpha^2/\rho^2)]. \quad (8)$$

Цього вимагає і теорія дальнього тропосферного розповсюдження радіохвиль.

Для визначення енергетичного вирашу при кутовому рознесенні необхідно знати ймовірність помилки від відношення сигнал/шум при одинарному прийомі та прийомі з кутовим рознесенням.

Відповідно до [22] при одинарному прийомі ймовірність помилки наступна:

$$P_{\text{пом}} \approx 1/h_0^2, \quad (9)$$

де  $h_0$  – середнє значення відношення потужності сигналу до потужності шуму.

Вираз для ймовірності помилки для подвійного некогерентного прийому наближено визначається наступним чином:

$$P_{\text{2пом}} \approx 4/h_0^2(1 - R). \quad (10)$$



Енергетичний виграш при подвійному прийомі в порівнянні з одинарним прийомом можна отримати, використовуючи формули (9), (10):

$$h_1^2/h_2^2 = \frac{1}{2} \sqrt{(1-R)/P_{\text{пом}}}, \quad (11)$$

де  $h_1, h_2$  – відношення сигнал/шум при одинарному та подвійному прийомі відповідно. Енергетичний виграш при кутовому рознесенні при орієнтації діаграми спрямованості вздовж напрямку розповсюдження радіохвиль на трасі знаходимо з урахуванням (8):

$$\Delta h_{2-1}^2 = \frac{h_2^2}{h_1^2} \delta. \quad (12)$$

Враховуючи (5), (6), (8) отримаємо:

$$\Delta h_{2-1}^2 = \frac{\sqrt{\exp[-2\beta_{\text{кр}}^2 \alpha^2 (1 - \frac{\alpha^2}{\rho^2})] [1 - \exp[-2\beta_{\text{кр}}^2 \alpha^2 (1 - \frac{\alpha^2}{\rho^2})]]}}{2\sqrt{P_{\text{пом}}}}. \quad (13)$$

Величина оптимального кута рознесення при якому має місце максимальний енергетичний виграш:

$$\beta_{\text{opt}} = \left[ \ln 2 / (2\alpha^2 (1 - \frac{1}{\rho^2})) \right]^{1/2}. \quad (14)$$

Підставляючи в (13) вираз (14) знаходимо максимальний енергетичний виграш при  $\beta_{\text{opt}}$ :

$$\Delta h_{\text{max}}^2 \approx 0.25 \sqrt{P_{\text{пом}}}. \quad (15)$$

На цифрових тропосферних станціях [23] можуть використовуватися дві просторово-рознесені антени і на кожній з них здійснювати кутове рознесення. Відповідно до роботи [22] наближена формула для ймовірності помилки при четвертому прийомі така:

$$P_{4\text{пом}} \approx \frac{8\pi e^2}{h_0^4 (1-R)^2}. \quad (16)$$

Енергетичний виграш при переході від подвійного просторово-рознесенного прийому до четвертого прийому з кутовим рознесенням з урахуванням (10), (16) можна представити наступною формулою:

$$\Delta h_{4-2}^2 = \frac{\sqrt{\exp[-2\beta_{\text{кр}}^2 \alpha^2 (1 - \frac{\alpha^2}{\rho^2})] [1 - \exp[-2\beta_{\text{кр}}^2 \alpha^2 (1 - \frac{\alpha^2}{\rho^2})]]}}{\sqrt[4]{12P_{\text{пом}}}}. \quad (17)$$

Використовуючи формули (14), (17) знаходимо максимальний енергетичний виграш при  $\beta_{\text{opt}}$  в порівнянні з подвійним просторово-рознесенним прийомом:

$$\Delta h_{4-2\text{max}} \approx 0.25 / \sqrt[4]{P_{\text{пом}}}. \quad (18)$$

Оцінимо попередньо оптимальні кути рознесення  $\rho_{\text{опт}}$  при різних діаграмах передавальної та приймальної антени в табл. 1.

Таблиця 1 – Оптимальні кути рознесення при наведених діаграмах спрямованості

$\beta_0$	$\beta_{\text{опт}}$
$1^0$	$51'$
$10^0$	$4^0 44'$
$12^0$	$5^0 22'$

З табл.1 видно, що при використанні відносно вузькоспрямованих антен величина оптимального кута рознесення  $\beta_{\text{опт}}$  відповідає приблизно половині ширини діаграми спрямованості приймальної антени для іоносферних ліній і незначно менше для тропосферних ліній.

## Висновки

При оптимальному куті рознесення (для заданої ширини діаграми спрямованості антени) ефективність подвійного та четвертого прийому не залежить від діаграм спрямованості антен, що використовуються.

При куті  $\beta_{\text{опт}}$  подвійний прийом при кутовому рознесенні в порівнянні з одинарним прийомом дає енергетичний виграш порядку 9 дБ при  $P_{\text{пом}} = 10^{-3}$  та 13 дБ при  $P_{\text{пом}} = 10^{-4}$ .

Подвійний прийом при кутовому рознесенні в порівнянні з подвійним просторово-рознесенним прийомом має енергетичний програш 3дБ.

При куті  $\beta_{\text{опт}}$  четвертий прийом з кутовим рознесенням порівняно зі подвійним просторово-рознесенним прийомом дає енергетичний виграш порядку 3 дБ при  $P_{\text{пом}} = 10^{-4}$ .

Четвертий прийом при використанні кутового рознесення в порівнянні з четвертим прийомом при просторовому рознесенні антен має енергетичний програш близько 3 дБ.

При кореляції сигналів  $R = 0,5 \dots 0,6$  ступінь поліпшення системи за рахунок рознесенного прийому практично така сама, як і при прийомі повністю некорельованих сигналів.

Враховуючи певну змінність коефіцієнта кореляції в часі, можна констатувати, що при  $R = 0,5 \dots 0,6$  ефективність кутового рознесенного прийому буде така ж, як і повністю некорельованих сигналів.

Для мобільних цифрових тропосферних станцій кутовий рознесений прийом краще реалізовувати по горизонталі, ніж по вертикалі.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Pochernyaev V., Syvkova N., Mahomedova M. Error Probability of a Multipath Communication Channel With Inaccurate Estimation of the Impulse Characteristic of Such Channel// Visnyk NTUU KPI Seria - Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia, 2023.- (92), pp. 23-27.
2. Почерняев В.Н., Повхлеб В.С. Управление мобильной цифровой тропосферно-радиорелейной станцией, Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку, 2014, №6, с.27-32.
3. Почерняев В.Н., Повхлеб В.С. Мобильная цифровая станция СВЧ диапазона двойного назначения. Научные труды ОНАС им. АС Попова, 2014, №2, с.76-82.
4. Почерняев В. Н. Состояние и направления развития мобильных цифровых радиорелейных систем / В. Н. Почерняев, В. С. Повхлеб // Системи озброєння і військова техніка. - 2018. - № 1. - С. 183-188.

5. Почерняев В.Н., Повхлеб В.С. Состояние и направления развития мобильных цифровых тропосферных систем связи. Системы озброєння і військова техніка, 2018, №2, с.51-60
6. Pochernyaev V. Іоносферний зв'язок з використанням штучних іонізованих неоднорідностей / V. Pochernyaev, M. Mahomedova, N. Syvkova // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2022. – Т. 2 (68). – С. 124-128. – doi:https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.2.124.
7. Weimin Kang. A Probabilistic Shaping Scheme for MIMO Systems with Signal Space Diversity/ IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 10-13 April 2022, Austin, TX, USA.
8. Xiang Gao. Enhanced MIMO cooperative communication based on signal space diversity/Xiang Gao, Zhanji Wu, Sheng He, Yongtao Shi, Xiaoping Zhou// 9th International Conference on Communications and Networking in China, 14-16 August 2014, Maoming, China.
9. Aekkarat Lorphichian. Performance analysis of space diversity for OFDM transmission/Aekkarat Lorphichian, Auttapon Pomsathit, Jintana Nakasuwan, Thanupong Srikalsin, Chawalit Benjangkprasert//International Conference on Control, Automation and Systems/14-17 October 2008, Seoul, Korea (South).
10. Chang-Soon Choi. Analysis of receiver space diversity gain for millimeter-wave self-heterodyne transmission techniques under two-path channel environments/Chang-Soon Choi, Yozo Shoji, Hiroyo Ogawa//IEEE Radio and Wireless Symposium, 09-11 January 2007, Long Beach, CA, USA.
11. Mehmet Akif Kurt. Spatial Modulation Using Signal Space Diversity/Mehmet Akif Kurt, Ali Tugberk Dogukan, Ertugrul Basar//IEEE Communications Letters, 11 January 2023, pp.1020 – 1024.
12. Tingting Song. Demonstration of Optical Wireless Communications using Spatial Modulation with Signal Space Diversity/Tingting Song, Ke Wang, Ampalavanapillai Nirmalathas, Christina Lim, Elaine Wong, Kamal Alameh // IEEE Photonics Conference (IPC), 29 September 2019 - 03 October 2019, San Antonio, TX, USA.
13. Сайко В. Г., Наконечний В. С., Баховський П. Ф., Сивкова Н. М. Алгоритм реалізації методу завадостійкого прийому сигналів, які випромінюються просторово-рознесеними передавачами. Modern science: problems and innovations. Abstracts of the 1st Int. scientific and practical conference. SSPG Publish. Stockholm, Sweden. 5-7 April 2020. Pp. 247-253.
14. Qin Li. A High Isolation UWB MIMO Antenna based on Angle Diversity /Qin Li, Yufa Sun//IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), 20-23 September 2020, Shanghai, China.
15. Chin-Lung Yang. Directional antennas for angular diversity in wireless sensor networks/Chin-Lung Yang, J.F. Mastarone, W.J. Chappell//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 03-08 July 2005, Washington, DC, USA.
16. Vipul Dixit. Performance Analysis of Indoor Visible Light Communication System with Angle Diversity Transmitter / Vipul Dixit, Atul Kumar// IEEE 4th Conf. on Information & Communication Technology (CICT), 03-05 Dec. 2020, Chennai, India.
17. Abrar S. Alhazmi. Angle Diversity Trasmmitter For High Speed Data Center Uplink Communications/Abrar S. Alhazmi, Sanaa H. Mohamed, Osama Z. Aletri, T. E. H. El-Gorashi, Jaafar M. H. Elmirghani //IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), 15-17 December 2021, Thessaloniki, Greece.
18. Roua Muwafaq Younus. Angle Diversity Receiver for Indoor Optical Wireless Communication Systems/Roua Muwafaq Younus, Mahmod Ahmed Al Zubaidy, Safwan Hafeedh Younus//4th International Conference on Advanced Science and Engineering (ICOASE), 21-22 September 2022, Zakho, Iraq.
19. Weitzen J. Analysis of diversity performance of space diversity and cross polarization for PCS base stations/J. Weitzen, M. Wallace//Ninth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (Cat. No.98TH8361), 06 August 2002, Boston, MA, USA.
20. Mengqi Zhang. Radar Polarization Diversity Technology for Low-altitude Targets / Mengqi Zhang, Lin Peng, Yan Liang, Yufei Wang, Jie Cui//CIE International Conference on Radar (Radar), 15-19 December 2021, Haikou, Hainan, China.
21. Прокис Дж. Цифровая связь - М.: Радио и связь, 2000.-800 с.
22. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений – М.: Сов.радио,1970. - 727с.
23. Патент України на винахід №122168 Мобільна високошвидкісна цифрова тропосферна станція/ Почерняев В.М., Повхліб В.С., Наритник Т.М.

Received (Надійшла) 12.10.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.12.2023

### Angular spaced reception on troposcatter and ionospheric communication lines

V. Pochernyaev, M. Mahomedova, N. Syvkova, O. Shefer

**Abstract.** In the article paper estimates the effectiveness of the angular diversity of signals on troposcatter and ionospheric communication lines by determining the optimal angle of diversity and energy gain from angular diversity. The dependence of the power at the input receiver of the azimuthal angle at the a angular diversity is presented. The correlation coefficient of the signal envelope at the angular spread in azimuth was obtained, which shows that the correlation is determined not only by the angular spread, but also by the ratio of the width of the antenna directional diagram to the width of the angular energy spectrum of waves scattered by the troposphere. The energy gain at the angular diversity when the directional pattern is oriented along the direction of the radio waves on the track is found. An approximate formula for the error probability of a quadruple reception is given. The formula for energy gain when switching from double spatially dispersed reception to quadruple reception with angular diversity is presented. The maximum energy gain at the optimal angle in compare with the double spatially dispersed reception is found. It was established that the double reception with angular separation has an energy loss in comparison with the double spatially separated reception. The optimal diversity angles for different antenna patterns diagrams is estimates. It is proved that the degree of improvement of the system due to the spread reception is almost the same as when receiving completely uncorrelated signals. Taking into account the change in the correlation coefficient over time, it was established that the efficiency of angular diversity reception will be the same as that of completely uncorrelated signals. It is recommended that angular spread reception for mobile digital troposcatter stations is better implemented horizontally than vertically.

**Keywords:** angular diversity reception, spatially diversity reception, troposcatter communication, ionospheric communication, correlation coefficient, energy gain.

Nikolai Starodubtsev, Sofia Khrustaleva, Victoria Nevlyudova, Rauf Allakhveranov

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

## OPTIMISATION OF OPTICAL INFOCOMMUNICATION NETWORKS

**Abstract.** The article reviews existing approaches to network analysis, taking into account the topological properties of networks. A sequential analysis from a network link to the properties of a set of network links is carried out. The network link is analysed as a set of optical channels, and an analytical description of the transmission quality in such a channel is carried out. A model for calculating crosstalk in the paths of information and communication optical networks is proposed. As can be seen from the results, for an optical fibre of a given length, there is a number of steps for selecting the input polarisation ellipse for which the efficiency of the method is maximised. Also, with an increase in the number of steps, we observe a decrease in the efficiency of this compensation method. So, for an optical fibre of a given length at constant dynamics, there is a number of input signal polarisation ellipses for which the polarisation-mode dispersion will be minimal. For a particular fibre, this parameter (the number of input signals) must be selected, because this value is different for different fibres (within the range of 15-30 points).

**Keywords:** network, optical channel, model.

### Introduction

Network analysis plays a crucial role in the design of optical information networks - it is thanks to the analytical apparatus that it becomes possible to draw a conclusion about the effectiveness of a particular network solution and identify mechanisms that can improve existing optical networks. In turn, a modern information and communication network is built using multi-channel optical paths, which are rather complex systems.

Therefore, there is a need to apply a consistent integration approach, starting with an analytical description of critical and important elements of the network structure and then summarising their properties in a global analytical description of the network.

Thus, it is necessary to form models of the links of the global network structure - tools for their study, considering the peculiarities of optical networks. It would also be useful to consider the approaches to analysing the link-network layer used in global backbone networks.

The analysis of an optical path link involves consideration of the entire set of influence parameters - both dispersion effects and nonlinear phenomena, noise and interference.

Consideration of existing approaches to network analysis is impossible without taking into account the topological properties of networks.

### Analysis of the network path

The network path is an integral element of any network design. The main technical parameters of networks depend on the capacity of the network path.

Modern backbone networks have gradually replaced radio relay communication lines, copper symmetrical and coaxial cables as information channels due to a sharp increase in requirements for transmitted/received information.

It should be added that the requirements for the reliability of the transmitted information are increasing in proportion to the requirements for the volume of transmitted information.

Analysing the path capacity is an important technical task. In this article, we analyse paths with time and spectral compression of information, which are widely and actively used in backbone networks in most countries of the world and Ukraine.

In time compression, the dispersion properties of fibres impede high and ultra-high data transmission rates. The article discusses the main methods of dispersion control and proposes a method of its compensation.

To analyse the spectral compaction, a complex of nonlinear effects arising in the guiding system - optical fibre - is considered. A generalising mathematical model of the optical channel transmission quality of a group optical path of a *DWDM* system is derived.

The methodology for calculating the network structure congestion based on its topology, proposed in [1, 2], makes it possible to determine the level of interference in an optical system implemented using the technology of all-optical networks.

Topological analysis also made it possible to create a new toolkit - the flow structure - and manage it within the capabilities of high-level network management technologies.

### Quality aspects of information transmission in *DWDM* systems

Q-factor is the *Electrical Signal-to-Noise Ratio* (*ESNR*) at the input of the receiver's decisive circuit. *ITU* Recommendation *O.201* is intended to the measurement of Q-factor. The relationship between Q-factor and *BER* (bit error rate) is described in *ITU G. Sup. 39*.

According to *O.201*, the Q-factor is defined as:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 - \sigma_0},$$

where  $\mu_1$  and  $\mu_0$  - transmission voltage levels "1" and "0";  $\sigma_1$  and  $\sigma_0$  - are deviations of the noise distribution at levels "1" and "0";  $\mu$  is the position of the decision threshold of the receiver logic circuit.

Q-factor is a system parameter that is determined by statistical patterns at the receiving end of the system when making decisions about the signal strength at any

given time. To ensure that the quality of information transmission over a fibre optic transmission system channel is determined, these patterns must consider all the noise (and, consequently, interference) in the system.

Therefore, the Q-factor is one of the main parameters that characterises the optical channel of a transmission system, regardless of whether it is a spectrally compressed or single-channel system.

The main system parameter that characterises the quality characteristics of a system with a digital method of information transmission is the reliability of information transmission. The main system parameter that characterises the quality characteristics of a system with a digital method of information transmission is the reliability of information transmission. In digital transmission systems, the reliability of information transmission is characterised by the  $K_{er}$  error rate (BER) or the  $P_{er}$  error probability arising in the process of transmitting a certain number of messages (bits of information). In general,  $P_{er}$  can be interpreted as a function of the signal-to-noise ratio ( $S/N$ ), i.e.

$$P_{er} = f(S/N).$$

For binary digital communication channels, this function is the Crump function, which is tabulated and widely used in engineering calculations. Thus, the calculation of  $P_{er}$  is equivalent to the calculation of the signal-to-noise ratio, which, in turn, is determined by analysing the total system channel noise, which includes crosstalk, equipment noise, and fibre noise.

### Accounting for nonlinear effects of optical components

*Stimulated Raman Scattering (SRS)* is a much lesser problem when compared to *Stimulated Brillouin Scattering (SBS)*. Real fibre-optic links (*FOCLs*) allow the use of an optical amplifier (*EDFA*) with a level of about 25 dBp or several amplifiers with a lower output level. *SRS* is similar in nature to *SBS* but is caused by different physical phenomena.

*SRS* is frequency-dependent and is more pronounced at short wavelengths than at long wavelengths (i.e., at higher frequencies). It can be noted that short-wave channels have a much lower amplitude compared to long-wave channels, i.e., there is a change in signal amplitudes for each channel. At the same time, it is the shorter-wave (high-frequency) channels that are subject to greater attenuation. In *WDM* systems, the effect of this type of scattering is to redistribute power from short-wave to long-wave channels. In this case, this phenomenon works like a Raman amplifier and the long-wave channels are amplified at the expense of the short-wave channels if the difference in wavelengths lies within the Raman gain band. This phenomenon can occur in quartz fibre, where gain can result from using a channel spacing of 200 nm.

Short-wave channels are the most impoverished, as their power can be simultaneously pumped into many channels at the same time. This redistribution of power between channels can be determined by the characteristics of the system because it depends on the

nature of the bit arrangement - amplification occurs only when binary "1" are presented in both channels at the same time. Such amplification leads to an increase in power fluctuations, which increases the receiver's noise level and worsens its performance. Raman crosstalk can be avoided if the channel powers are so small that the gain is negligible along the entire length of the fibre. When Raman amplifiers are used in *DWDM* systems, it is necessary to consider the fact of crosstalk caused by the presence of several signals transmitted at different wavelengths.

*SRS* can occur in systems that use both single and multimode fibre. To observe *SRS* in the presence of only one channel, without the use of an optical amplifier, it is necessary to have a signal level of about +30 dBp. The literature [5,6] indicates that the threshold at which a 1 dB degradation is observed in a multichannel system caused by the presence of Raman radiation can be estimated from the inequality:

$$P_{tot} \cdot \Delta\lambda \cdot L_{eff} < 40[mW \cdot nm \cdot Mm], \quad (1)$$

where  $P_{tot}$  – total capacity of all WDM channels (mW);  $\Delta\lambda$  – the optical spectrum band (nm) in which these channels are distributed;  $L_{eff}$  – effective length, measured in megameters (Mm), which is defined as:

$$L_{eff} = \frac{4,343}{a}(1 - e^{-0.23aL}), \quad (2)$$

where  $a$  - fibre attenuation coefficient (dB),  $L$  - fibre length (km).

According to (1), (2) we write from:

$$K_{SRS} = \frac{P_{tot} \cdot 4,343 \cdot \Delta\lambda}{40 \cdot a} (1 - e^{-0.23aL}) (\text{dBp}). \quad (3)$$

The *SRS* threshold for systems using G.653 fiber is slightly lower than for systems using G.652 fiber due to the smaller effective area of G.653 fiber. *SRS* has virtually no degradation in single-channel systems. The *SRS* effect actually limits the light output in the channel.

When using single-channel systems, unwanted spectrum regions can be eliminated by using filters. For *WDM* systems, there are currently practically no techniques that would allow to eliminate the *SRS* effect. However, the impact of *SRS* can be decreased by reducing the input optical power.

*SBS (Stimulated Brillouin Scattering)* sets an upper limit on the level of optical power that can be transmitted by an optical fibre. When a certain level of optical power, called the *SBS* threshold, is exceeded, an acoustic wave is generated in the OF, which changes the refractive index  $n$ . Changes in  $n$  cause light scattering, which leads to additional generation of acoustic waves. To excite the Mandelstam-Brillouin scattering, the spectral density of the initial radiation should be much higher than for Raman scattering - 10 mW in the frequency band 10-50 MHz. As a result of this effect, a wave with a shifted frequency (*Stokes wave*) propagates in the opposite direction to the light source, which reduces the useful transmitted optical power. This limits the maximum achievable power that can be transmitted by the transmitter into the line. For example, at a wavelength of

1550 nm, the scattered light is shifted to the right by approximately 11 GHz. This scattering (*SBS*) has the lowest threshold power. It has been shown that the *SBS* threshold can vary depending on the type of fibre and even depending on the specific fibre. The threshold is on the order of 5 to 10 mW for narrowband externally modulated lasers. For directly modulated lasers, this power can be around 20-30 mW. For G.653 fibres, the *SBS* threshold is slightly lower than for G.652 systems. This is due to the smaller effective area of G.653 fibres. It can also be said that this is true for all the nonlinear effects considered. The *SBS* threshold is sensitive to the spectral width of the radiation source and the radiated power level. However, it does not depend on the number of *WDM* channels.

In addition to the effect of reducing the useful power, noise occurs (the relative noise intensity (*RIN*) increases, for example, from -155 dB/Hz to -138 dB/Hz), which worsens the BER (probability of error) characteristics. It is especially important to control *SBS* in high-speed transport optical systems, necessarily using external modulators and *CW* (*Continuous Wave*) laser sources.

The resulting acoustic wave is hypersonic in nature, and its frequency spectrum can be located in the band up to 10...13 THz ( $10^{13}$  Hz). *SBS* limits the level of light energy that can be transmitted by the fibre. The level of input power introduced into the fibre, at which a sharp increase occurs, is defined as the *SBS* threshold, and is described by the formula:

$$P_{th} = 21 \cdot \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}} \cdot \frac{\Delta\nu_p - \Delta\nu_B}{\Delta\nu_B}, \quad (4)$$

where  $g$  – Brillouin gain coefficient,  $A_{eff}$  – effective core area,  $K$  is a constant determined by the degree of polarisation state freedom, for G.652 –  $K = 2$ .

$\Delta\nu_B$ ,  $\Delta\nu_p$  are variables representing the spectral width of the Brillouin band and the pumping source, respectively;  $L_{eff}$  – effective length.

The degradation caused by *SBS* does not occur in systems where the line width of the radiation source is significantly greater than the Brillouin bandwidth or where the signal power is less than the *SBS* threshold power.

It can be assumed [5] that if the theoretical threshold (4) is exceeded, the *KSBS* degradation will be approximately 10 dBp per channel, which is absolutely unacceptable.

Four-wave mixing (FWM) occurs if two signals with different frequencies and sufficiently high intensity are introduced into the channel - the spectrum of the scattered signal will contain components with four frequencies (taking into account Rayleigh-Mandelstam scattering), and in the case of superposition of two of the frequencies on each other, which is quite possible, photons with frequencies that differ from the carrier appear

$$\nu_{c3} = \nu_u - 2\omega_c.$$

The frequency spectrum of the scattered radiation is expanded, and some of the components can be enhanced by suppressing others. Given  $N$  optical carriers,

the number of components resulting from the FWM is determined by the ratio (5):

$$0,5N^2(N-1). \quad (5)$$

The FWM can also occur with a single optical signal that transmits information by amplitude modulation, i.e., its spectrum consists of three main components: the central frequency and side frequencies; at high transmission rates, the side frequencies are very far apart from the central frequency, so each of them is an independent carrier from the point of view of the FWM. The effect of FWM on transmission is manifested as additional crosstalk, inter-symbol interference at high transmission rates, and impoverishment of the power of signals from some channels due to the influence of signals from other channels.

The effectiveness of the FFS is also sensitive to the total optical power in the fibre. An approximate formula for calculating the *FWMP* efficiency for SMF-28, taking into account the frequency spacing of  $N$  channels  $d_f$  can be written as:

$$FWM [\text{dB}] \approx -57 + 10 \lg \left( \frac{N}{d_f} \right) + \frac{1200}{d_f}, \quad (6)$$

Thus, for an 8-channel *CWDM* with a frequency spacing of  $df = 200$  GHz (192.4 - 193.8 THz), the *FWMP* will be  $\sim -46.7$  dB, and for a 16-channel *CWDM* with a frequency spacing of 100 GHz, the *FWMP* will be  $\sim -37.7$  dB.

Recall that the electrical equivalent of *FWMP* is equal to twice the optical efficiency of *FWMP* and for the latter case will be equal to -75.4 dB.

FWM has the greatest parasitic effect in FOCs in which the optical path is built on G.653 *DSF* zero-dispersion shifted fibre; FWM is practically not manifested in single-mode standard G.652 *SMF* fibre. Experiments have shown that for G.653 fibres, this interference is unacceptable (up to 20 dBp), while for G.652 it is practically absent.

In order to adequately suppress the generation of FWM products, the industry has proposed the use of fibres with a minimum permissible but non-zero dispersion in the gain region of optical amplifiers. As an alternative, it is proposed to use alternating spans with opposite dispersions. Of course, it is possible to provide an increase in the channel spacing and the existence of an uneven spacing between them, thereby reducing the level of interference from the FWM.

### Active components of optical systems with spectral channel compression

If certain DWDM specifications require compliance with a small emission bandwidth (0.01...0.5 nm) G.692, G.957, not all emitters provide it.

The spectrum of the intensity-modulated signal resembles that of an AM signal. It contains lateral components, and the spectrum of the output signal must be limited to the first harmonic of the signal clock. Frequency instability for STM-64 at 10 GHz will cause overlap with the frequencies of the neighbouring group channel, unacceptable noise growth, signal suppression

and system malfunction. For STM-256, even half the tolerances of the STM-64 system are out of the question. That is, the frequency stabilisation system must be of very high quality. For STM-64, the width of the spectral line should not exceed 0.08 nm at spectral intervals of 50 GHz. For STM-16 = ±0.5 nm (G.957).

Exit from the specified frequency bands leads to the appearance of unacceptable crosstalk. In principle, the issue can be solved by introducing additional filters, but this will entail a significant increase in the cost of the system and the need to use additional amplifiers.

Let us calculate the noise figure of the radiation source together with the photodetector using the analysis formulas from [6-7]:

$$K_{N,RS} + K_{N,FD} = \frac{m^2}{2\Delta\nu_{chan}} \left( R + \frac{2q}{P_{in}S} + \frac{I_n^2}{P_{in}^2 S^2} \right)^{-1}, \quad (7)$$

where  $m$  - channel optical modulation index, often referred to as *OMI* (*Optical Modulation Index*).

It is usually expressed as a percentage, but a dimensionless value, such as  $m[\%]/100$ , should be substituted into the calculation formulas.

For example,  $m = 4\%$  is equivalent to  $m = 0.04$ ;  $\Delta\nu_{chan}$  - channel noise band in a selected band;  $R$  - relative intensity of noise *RIN* (*Relative Intensity Noise*), which is calculated as the noise power reduced to a 1 Hz band relative to the optical power of the unmodulated carrier, dB/Hz;  $q$  - electron charge;  $S$  - sensitivity of the optical module, which depends on the optical wavelength.

Typical values of  $S$  are  $S_{1310} = 0.85$  A/W and  $S_{1550} = 0.95$  A/W for wavelengths of 1310 nm and 1550 nm, respectively. Physically, the  $S$  parameter indicates the current (in mA) that will appear at the output of the photodetector when an optical power of 1 mW (0 dBp) is applied to its input;

$I_n$  is the equivalent noise thermal current of the amplifier, measured in pA/Hz. A typical value of  $I_n$  for a transimpedance stage based on a *GaAs* field-effect transistor is  $7...8$  nA/√Hz. Nowadays, amplifying transistors with low noise and very high input impedance have appeared, and they have an input noise current of up to  $5$  nA/√Hz.

In addition, as the frequency band is limited, the total useful power will decrease, and as it grows beyond the limit, it will decrease due to redistribution to the prohibited out-of-channel frequency range, thus initiating a decrease in the signal-to-noise ratio, which, in turn, is equivalent to a deterioration in the quality of information transmission in the system.

Let us write down the interchannel interference level coefficient of an optical signal, which characterises power losses [5-6]:

$$K_{chan} = P_{chan} \cdot e^{-\frac{5\Delta\nu_{bands}}{\Delta\nu_{in}}}, \quad (8)$$

where  $P_{chan}$  - optical channel power;  $\Delta\nu_{bands}$  - frequency range allocated to a channel.

The optical amplifier increases the level of not only the useful optical signal, but also the parasitic harmonics,

which, in fact, form the basis for crosstalk in optical systems. In addition, optical amplifiers (both *EDFA* and *SRS*) have their own noise.

The noise figure (*NF*) of an amplifier is caused by amplified spontaneous emission (*ASE*). The *ASE* noise figure is determined from the following expression [5]:

$$NF = \frac{2P_{ASE}}{h\nu_c\Delta\nu(G_A - 1)} (\text{dB}), \quad (9)$$

where  $P_{ASE}$  - power of amplified spontaneous radiation;  $h$  - Planck's constant;  $\nu_c$  - signal frequency.

$$P_{ASE} = 2n_s h\nu\Delta\nu_A(G_A - 1), \quad (10)$$

where  $n_s$  - spontaneous emission rate.

The spontaneous emission factor can take on a value from 1 to 10 for optical amplifiers with  $G_A > 1$ . For typical erbium amplifiers of modern fibre-optic information transmission systems with  $G_A > 10$  dB, the typical *NF* value is in the range of  $3\text{dB} < \text{NF} < 6\text{dB}$ . If the amplifiers are switched on in successive stages, it can be shown that the noise figure of the first stage determines the noise figure of the entire amplifier. The noise figure  $NF_R$  of a Raman distributed amplifier is determined from the expression:

$$NF_R = 2 / \ln G_R, \quad (11)$$

where  $G_R$  - is the coefficient of gain of the Raman amplifier, which is determined from the expression:

$$G_R = e^{\frac{g_R P_h L}{A_{ef}}}, \quad (12)$$

where  $g_R$  - Raman coefficient;  $P_h$  - pumping power;  $A_{ef}$  - effective cross-sectional area;  $L$  - fibre length.

We can assume  $g_R = 7 \cdot 10^{-17}$  km/W. The actual pumping power ranges from 0.5...0.8 W to several watts [6]. Thus, we obtain the total noise figure of the optical amplifier:

$$K_{N,OA} = \frac{1}{M} \sum_M K_{N,chan} \cdot (NF_{A_M} - K_{A_M}), \quad (13)$$

where  $NF_A$  - noise of a particular amplifier;  $K_A$  - coefficient of gain of the amplifier;  $K_{N,chan}$  - noise figure of the transmission channel obtained before each optical amplifier;  $M$  - number of amplifiers.

The photodetector noise and, accordingly, the coefficient  $K_{N,chan}$  are set based on the information provided by the manufacturers.

$K_{N,chan}$  is also calculated based on the data provided by the equipment manufacturers.

In practice, a 3 dB margin is taken into account in terms of signal-to-noise ratio due to the frequency-exchange coding (*FEC*) used in backbone fibre-optic transmission systems. This margin is introduced as an improvement of the signal-to-noise ratio at the photodetector and is not the maximum possible.

## Conclusions

In this article, we have considered a sequential analysis from the network link to the properties of a set of network links.

The network link is analysed as a set of optical channels, and an analytical description of the transmission quality in such a channel is given.

A model for calculating crosstalk in optical network paths is proposed.

As can be seen from the results, for an optical fibre of a given length, there is a number of steps for selecting the input polarisation ellipse for which the efficiency of the method is maximised.

Also, with an increase in the number of steps, we observe a decrease in the efficiency of this compensation method. This is due to the fact that during the selection of the minimum value, transmission is also carried out, and the value of the differential group delay is not minimal. Of course, with a decrease in dynamics (an increase in the time during which the optical fibre does

not change), the efficiency of using the compensation method increases.

So, for an optical fibre of a given length at constant dynamics, there is a number of input signal polarisation ellipses for which the polarisation-mode dispersion will be minimal.

For a particular fibre, this parameter (the number of input signals) must be selected, because this value is different for different fibres (within the range of 15-30 points).

The speed of determining one value of differential group delay at the output of the optical line path and transferring this value to the transmitting side is fixed, and therefore 20 measurements and 100 measurements (for different numbers of input channels) also take this time.

#### REFERENCES

1. Korets M.S. Materials science of information technology: a textbook / M.S. Korets, I.G. Tregub, S.M. Yashanov; Ministry of Education and Science, Youth and Sports of Ukraine, National Pedagogical Dragomanov University. - K.: Drahomanov National Pedagogical University, 2011. - 589 p.
2. Ivanenko I. M. Structural materials in the production of inorganic substances / Textbook for students of speciality 161 "Chemical Technology and Engineering" / I. M. Ivanenko - Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2018. - 242 p.
3. Physicochemistry and technology of organic and inorganic carbon fibres: Monograph / Edited by Sirenko H.O. and Komashko O.V. - Ivano-Frankivsk: V.P. Suprun Publishing House, 2019. - 170 p.
4. Glass, ferroelectrics, graphene, high-temperature superconductors. - Part 6: a textbook / O.T. Bogorosh, S.O. Voronov, R.I. Petryshyn, V.M. Kramar, O.G. Shayko-Shaykovsky (eds.). Chernivtsi: Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University. 2022. - 312 p.
5. Panasiuk B.C., Savruk M.P., Datsyshyn O.P. Stress distribution near cracks in plates and shells. - Kyiv: Naukova Dumka, 1976. - 443 p.

Received (Надійшла) 2.10.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.12.2023

#### Оптимізація оптичних інфокомунікаційних мереж

М. Г. Стародубцев, С. В. Хрустальова, В. В. Невлюдова, Р. Ю. Аллахверанов

**Анотація.** У статті розглянуто наявні підходи до мережевого аналізу, з урахуванням топологічних властивостей мереж. Проведено послідовний аналіз від мережевої ланки до властивостей сукупності мережевих ланок. Проаналізовано мережеву ланку як сукупність оптичних каналів, проведено аналітичний опис якості передачі в такому каналі. Запропоновано модель для розрахунку перехресних завад у трактах інфокомунікаційних оптичних мереж. Як видно з отриманих результатів, для оптичного волокна заданої довжини існує така кількість кроків вибору вхідного еліпса поляризації, для якої ефективність методу є максимальною. Також при збільшенні кількості кроків ми спостерігаємо падіння ефективності використання такого методу компенсації. Отже, для ОВ заданої довжини за постійної динаміки існує така кількість еліпсів поляризації вхідного сигналу, для якої поляризаційно-модова дисперсія буде мінімальною. Для конкретного волокна цей параметр (кількість вхідних сигналів) потрібно добирати, бо для різних волокон це значення є різним (перебуває в межах 15-30 точок).

**Ключові слова:** мережа, оптичний канал, модель.

## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Аллахверанов Р. Ю.	67, 171	Караман Д. Г.	85	Пустовойтов П. Є.	152
Андрусенко Ю. О.	129	Карпунін І.	106	Рибак Т. В.	59
Барсов В. І.	40	Ключніков І. М.	22	Рудницький В. М.	96
Беліков А. С.	147	Коваленко А. А.	30	Сабельнікова П. С.	125
Болібрух Б. В.	143	Козлітін О. О.	143	Савченко Н. П.	63
Бороздін М. К.	55	Кононова О. А.	52	Севостьянова О. М.	30
Боряк Б. Р.	49	Краснобаєв В. А.	125	Сердюков Д. В.	102
Власенков Д. П.	67	Кучук Н. Г.	134	Серпухов О. В.	59
Воронець В. М.	152	Лаврут О. О.	595	Северінов О. В.	102
Гавриленко С. Ю.	70	Ларін В. В.	96	Сивкова Н. М.	167
Гриценко І. К.	110	Лещинський В. О.	120	Сидоренко З. М.	102
Гусак І. Л.	34	Леві Л. І.	55	Стародубцев М. Г.	67, 171
Дженюк Н. В.	160	Любченко Р. О.	125	Сухоребрій О. В.	49
Дзюбан О.	156	Магомедова М. С.	167	Сухотеплий В. М.	59
Довгалюк О. М.	63	Макогон О. А.	59	Талибов Р.	156
Дрючко О. Г.	49	Мартовицький В. О.	30	Терещенко О. В.	59
Дяченко В. О.	75	Мельник О. Г.	96	Тищенко Д.	106
Єрмілов Р. О.	80	Міхаль О. П.	75	Токарев В. В.	110
Єрмілова Н. В.	80	Наймитенко С. І.	137	Трег'як А. В.	63
Железняков Є. О.	147	Невлюдова В. В.	171	Фесенко Т. Г.	129
Заєць А. Ю.	5	Ненич Д. О.	49	Франчук Т.	106
Замана А. А.	34	Нікітіна Л. О.	160	Харченко В. С.	114
Захаров Р.	106	Овдіюк Є. М.	40	Хрустальова С. В.	171
Зима О. Є.	55	Орехов О. О.	91	Чалий С. Ф.	120
Зоураб Ю. Р.	80	Осадчий Д. Б.	143	Шевченко І. І.	110
Зуєв А. О.	12, 85	Підласий Д. А.	96	Шефер О. В.	167
Івасюк О. О.	114	Подорожняк А. О.	137	Шиман А. П.	134
Ільїна І. В.	110	Положий Д. С.	91	Янко А. С.	125
Калініченко Є. В.	5, 18	Полторацький В. О.	70	Янковський О. А.	30
Канівець Б.	156	Постніков Є. Є.	18		
Капітон А.	156	Почерняєв В. М.	167		

Наукове видання

## СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Збірник наукових праць

Випуск 4 (74)

Відповідальна за випуск *К. С. Нестеренко*

Технічний редактор *Т. В. Уварова*

Коректор *О. В. Морозова*

Комп'ютерна верстка *Н. Г. Кучук, І. Ю. Петровська*

Оформлення обкладинки *І. В. Ільїна*

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 19512-93/2ПР від 16.11.2012 р.

Підписано до друку 14.12.2023. Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 22,0. Тираж 120 прим. Зам. 1214-23  
Адреса редакції: Україна, 36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24, тел. (050) 302-20-71  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Віддруковано з готових оригінал-макетів у цифровій друкарні Impress

61002, м. Харків, вул. Пушкінська, 56, тел. + 38 (057) 714-52-11

e-mail: [irina@impress.biz.ua](mailto:irina@impress.biz.ua)