

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 (70)

Issue 4 (70)

## 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 29 листопада 2022 року № 20).*

*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 • 2022

## 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, доц., 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, доц., 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., Харків, Україна*);  
СТАНКУНАС Йонас  
(*д-р техн. наук, проф., Вільнюс, Литва*);  
ТИМОЧКО Олександр Іванович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);  
ТИМОЩУК Олена Миколаївна  
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);  
ТРИСТАН Андрій Вікторович  
(*д-р техн. наук, доц., Чернігів, Україна*);  
ФРОЛОВ Євгеній Андрійович  
(*д-р техн. наук, проф., Полтава, Україна*);  
ЧОРНИЙ Олексій Петрович  
(*д-р техн. наук, проф., Кременчук, Україна*);

### Відповідальний секретар:

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

### Технічний секретар:

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.), Ass. 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*);  
Jonas STONKUNAS  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Vilnius, Lithuania*);  
Oleksandr TYMOCHKO  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);  
Olena TYMOSHCHUK,  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);  
Andrii TRYSTAN  
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Chernihiv, Ukraine*);  
Yevhen FROLOV  
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Poltava, Ukraine*);  
Oleksii CHORNYI  
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Kremenchuk, Ukraine*).

### Responsible secretary:

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

### Technical secretary:

Inna PETROVSKA  
(*MSD of Comp. Eng., Kharkiv, Ukraine*).

# З М І С Т

## АВТОМОБІЛЬНИЙ, РІЧКОВИЙ, МОРСЬКИЙ ТА АВІАЦІЙНИЙ ТРАНСПОРТ

<i>Левченко О. В.</i> Метод оцінки та прогнозування навігаційної ситуації під час руху судна .....	4
<i>Мураховська О. А., Українець Н. А.</i> Алгоритм визначення оцінки ефективності літальних апаратів транспортної категорії .....	10
<i>Окоро О. Ч., Дмитрів С.О., Заліський М.Ю., Осінчук А.О.</i> Моделі для аналізу надійності авіаційних компонентів, систем та конструкцій повітряних суден.....	16
<i>Серебрянникова В. Ю.</i> Розробка методу розстановки пріоритетів синтезованих варіантів рішень для обґрунтування типу будівництва (модернізації) повітряного судна .....	22

## УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

<i>Денисенко М. А., Зуєв А. О., Євсіна Н. О., Леценко В. М.</i> Оптимізація системи сушіння з застосуванням прогнозуючої моделі .....	28
<i>Євсіна Н. О., Зуєв А. О., Гапон А. І., Денисенко М. А., Тарасенко М. В.</i> Синтез адаптивного нечіткого логічного регулятора для керування температурою у камерній сушарці .....	32
<i>Заповловський М. Й., Мезенцев М. В.</i> Оптимізаційна модель для синтезу системи керування електроприводу змінного струму на основі використання алгоритму векторного управління .....	36
<i>Кльон А. М., Трет'як А. В.</i> Визначення вітрового навантаження на баштовий кран за ГОСТ 1451-77 та ДБН В.1.2-2:2006 .....	42
<i>Червотока О. В., Подорожняк А. О., Чередніков О. М., Лапто І. М.</i> Аналіз систем терморегулювання та способів вимірювання температури .....	45

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Аль-Амморі А. Н., Дехтяр М. М., Абдусалам Х. І. С.</i> Комп'ютерні та інформаційні технології планування експериментів .....	51
<i>Вадурін К. О., Перекрест А. Л., Гученко М. І.</i> Прототип кіберфізичної системи моніторингу фізичного стану оператора літального апарата .....	57
<i>Golovko G., Isai D.</i> Usage of IT technologies in medicine and genomics .....	66
<i>Golovko G., Tolochyn M.</i> Using the aes encryption method in practice .....	71
<i>Дресва Г. М.</i> Метод імітаційного моделювання трафіку комп'ютерної мережі з фрактальними властивостями ...	75
<i>Канарський С. О., Орехов О. О., Стадник А. О.</i> Оцінювання якості систем доповненої реальності: аналіз стану досліджень .....	79
<i>Kapiton A., Skakalina O., Baranenko R.</i> Design and software implementation of a knowledge exchange web service .....	88
<i>Козлов В. Є., Козлов Ю. В., Пасічник А. В.</i> Застосування положень загальної теорії вимірювань при розв'язанні задач відбору .....	91
<i>Кулягін А. І., Нарожний В. В., Ткачов В. М., Кучук Г. А.</i> Дослідження методів побудови рекомендаційних систем для розв'язання задачі вибору найбільш релевантного відео при створенні віртуальних арт-композицій .....	94
<i>Kuchuk N., Shyman A.</i> A method for distributing transactions to hybrid cloud data storage .....	100
<i>Микусь С.А., Васюхно С.І.</i> Метод визначення імовірнісних характеристик трафіка системи моніторингу стану уражених об'єктів.....	104
<i>Мосоль М. І., Мелешко Є. В., Якименко М. С., Бащенко Д. В.</i> Програмне імітаційне моделювання епідемії засобами мови Python та пакету інструментів EpiModel для мови R .....	108
<i>Rudenko O., Bilokin O.</i> Application of generative diffusion models in digital image creation .....	114
<i>Filonenko A., Molchanov H., Belliorin-Herrera O.</i> The method of calculating the capacity of the cloud component of the distributed multiservice network .....	117
<i>Shefer O., Nikitchenko E.</i> Cyber protection of ENERGOIL enterprises .....	122
<i>Щеглов В. Р., Морозова О. І.</i> Методи та технології розроблення цифрових двійників для гарантоздатних систем індустріального інтернету речей .....	127

## ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

<i>Бурдейна Н. Б., Бірук Я. І.</i> Засоби підвищення ефективності рідинних матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону .....	138
<i>Глива В. А., Землянська О. В., Ільчук О. С.</i> Методологія визначення рівня захисту працюючих в умовах позарегламентних температурних впливів .....	142
<i>Скоробогатько С. В., Фесенко Г. В.</i> Перспективи використання літаючих хмарних, граничних та туманних обчислень компонентами системи моніторингу потенційно небезпечних об'єктів .....	145
<i>Ченчева О. О., Ченчевой В. В., Бахарев В. С., Литвиненко М. Ю., Лашко Є. С., Геращенко С. М.</i> Використання технологій доповненої та віртуальної реальності для набуття hard and soft skills при навчанні спеціалістів цивільної безпеки .....	153

## ЗВ'ЯЗОК, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА

<i>Почерняєв В. М., Магомедова М. С., Сивкова Н. М.</i> Фазо-частотний пристрій на частково заповненому діелектриком прямокутному хвилеводі .....	158
<i>Царьков Р. М., Єрмілова Н. В.</i> Підвищення точності функціонування фазового автопідстроювання за ознаковими характеристиками сигналів .....	162
<b>АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК</b> .....	166

# Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 629.123

doi: 10.26906/SUNZ.2022.4.004

О. В. Левченко

Державний університету інфраструктури та технологій, Київ, Україна

## МЕТОД ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ СИТУАЦІЇ ПІД ЧАС РУХУ СУДНА

**Анотація.** Сучасний рівень розвитку техніки та навігаційних систем дозволяє виконувати прогнозування розвитку навігаційної ситуації з високою точністю та виконувати моніторинг навігаційних об'єктів. Існуючі системи позиціонування дозволяють отримувати точні координати навігаційних об'єктів. Універсальна автоматична інформаційна система дає можливість передавати дані всім учасникам руху в режимі реального часу. За допомогою адаптивних моделей прогнозування можливий розрахунок траєкторій та визначення небезпеки небезпечного зближення, тому дане завдання є актуальним. У статті удосконалено метод оцінки та прогнозування навігаційної ситуації під час руху судна на основі адаптивної нечіткої ситуаційної мережі. Вона враховує параметри навігаційної ситуації, прогноз її розвитку та рівень комплексної безпеки руху судна в єдиній концепції e-Navigation, що дозволяє підвищити безпеку судноплавства. У роботі запропоновано нечітку ситуаційну мережу, що характеризується можливістю гнучкої зміни компонентів мережі у процесі їх побудови та використання. У статті застосовується теоретичний метод для дослідження проектів e-Навігації. Досліджується питання про стан та перспективи реалізації технології e-Навігації, яка є однією з основних ініціатив Міжнародної морської організації. Зазначається, що, незважаючи на впровадження інтегрованих системи ходового містка, навігаційні помилки внаслідок людського фактору є однією з головних причин морських аварій. Розглядається ініціатива, що передбачає створення цифрової інфраструктури на судовому та береговому сегментах, що забезпечує обмін даними та інтеграцію існуючих та нових навігаційних морських інструментів, що дозволить здійснити перехід навігаційної інформації у цифровий формат.

**Ключові слова:** судно, судноводій, навігаційна обстановка, навігаційні системи, e-Навігація, нечітка ситуаційна мережа.

### Вступ

Інтегрована система ходового містка (Integrated Bridge System, IBS) – програмно-апаратний комплекс, в якому застосовано системний підхід до автоматизації процесів збирання, обробки, відображення інформації, до виконання функцій навігації, керування судном, радіозв'язку та забезпечення безпеки з метою досягнення максимальної ефективності вахти на містку кваліфікованим персоналом [1]. У рамках концепції e-Navigation [2] одним із завдань інтелектуалізації IBS є визначення таких параметрів управлінського впливу на судно, які, відповідно до інформаційної моделі стану навігаційної обстановки в системі "судноводій-судно-обстановка", приведуть його з початкової до кінцевої точки маршруту із заданим рівнем ефективності та безпеки. Тому до складу IBS необхідно включити підсистеми оцінки та прогнозування стану навігаційної обстановки на методах штучного інтелекту, методах підтримки прийняття рішень та теорії інформації. Загальна структура системи "судноводій-судно-обстановка" та місце системи e-Navigation та IBS наведено на рис. 1.

Судноводій для здійснення управлінського впливу на рух судна здійснює вирішення завдань, пов'язаних з їх моніторингом, аналізом та оцінкою навігаційної ситуації. Тому інтегровані системи ходового містка мають автоматизувати процеси:

– моніторингу інформації про навігаційну обстановку, що надходить від різномірних ДІ;

– оперативного відстеження єдиного інформаційного простору, в якому здійснюють діяльність інші судна та берегові служби;

– визначення комплексу факторів, що мають найбільший вплив на розвиток ситуації.

– контролю та управління судном на основі своєчасного прогнозу розвитку ситуації.

Процес прогнозування розвитку ситуації є невід'ємною частиною системи e-Navigation, що входить до складу інтегрованої системи ходового містка. Основними вирішуваними завданнями у процесі прогнозування розвитку ситуації є:

– прогнозування факторів обстановки;

– формування комплексних оцінок;

– виконання цільових прогнозних розрахунків з урахуванням різних параметрів;

– обґрунтування та оцінка досяжності цілей управлінського впливу.

Процес планування забезпечує оптимальний розподіл ресурсів для досягнення поставленої цілей управління судном.

Особливостями завдання створення систем оцінки навігаційної обстановки та прогнозування її розвитку є:

– неповнота та невизначеність вихідної інформації про склад та характер загроз;

– необхідність врахування великої кількості кількісних та якісних часових показників;

– неможливість застосування класичних методів оптимізації.

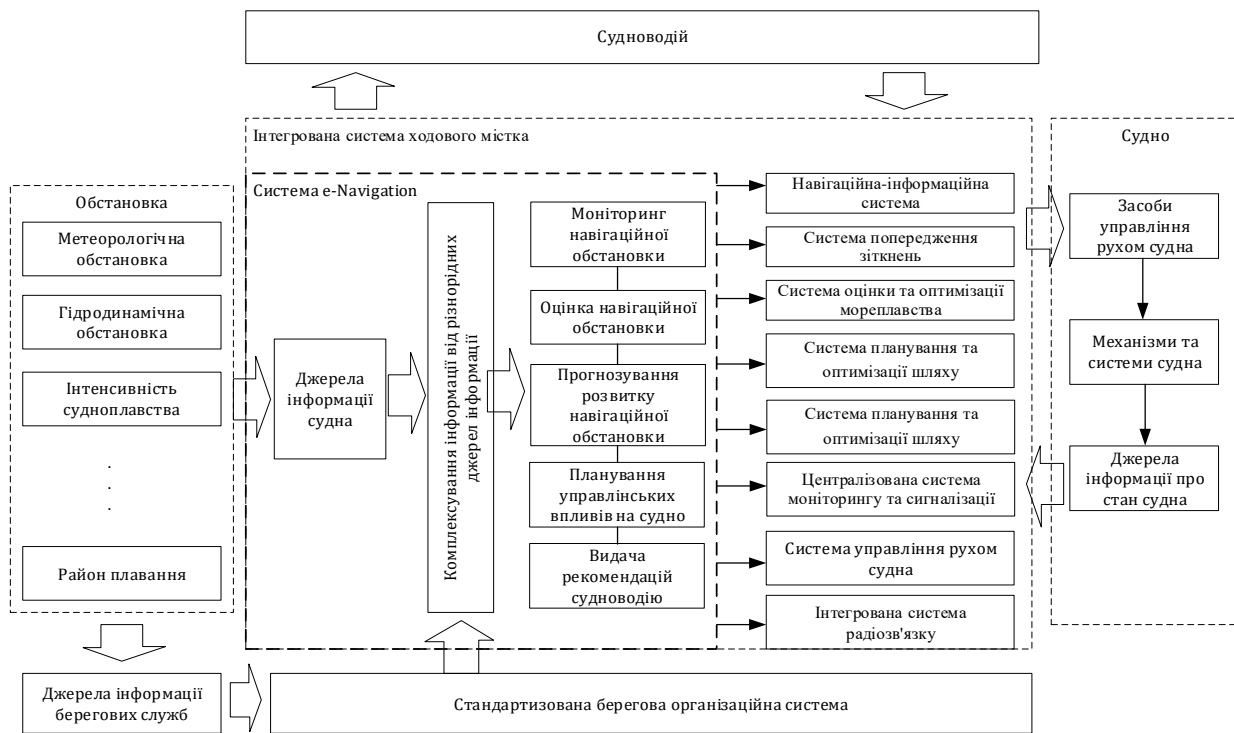


Рис. 1. Структура системи "судноводій-судно-обстановка" (джерело: розроблено автором)

Проте аналіз методів та алгоритмів обробки даних, особливості їх застосування та зв'язок з режимами ходового містка та типами невизначеності вхідної інформації, дозволяє реалізовувати інтегровані системи ходового містка в рамках концепції e-Navigation.

Таким чином, забезпечення обміну даними у цифровому форматі між судновим і береговим сегментами при інтеграції існуючих та застосуванні перспективних навігаційних морських інструментів, у тому числі при оцінці та прогнозуванні навігаційної ситуації під час руху судна, є актуальним напрямком подальших наукових досліджень.

**Аналіз публікацій за темою дослідження.** Перспективи e-Навігації в судноводінні розглянуті в роботі [3], де описується майбутнє даної системи, пов'язане з постійним технологічним удосконаленням, що робить можливим подальший розвиток стратегії e-Навігації як засобу забезпечення безпеки судноплавства.

Дослідження, що стосуються e-Навігації, розглянуті в роботі [4], як найбільш перспективний напрямок застосування інформаційних технологій у галузі морського та річкового транспорту.

У роботах [5, 6] викладено основні питання проблеми забезпечення безпечного плавання суден, до яких належать використання сучасних систем автоматичного управління рухом суден, експериментальне визначення безпечних відстаней під час розходження суден, що запобігають виникненню явища присмоктування.

У роботі [7] викладено питання забезпечення безпеки судноводіння за допомогою інтегрованих систем ходового містка, розглянуто їх принципи побудови та склад, місце таких систем у загальній комплексній системі керування судном.

Значну роль у забезпеченні безпеки судноводіння грають навігаційно-інформаційні системи (НІС) судна, що вказується в роботі [8]. У роботі проведений аналіз сучасних датчиків оперативної навігаційної інформації, а також зазначаються обмеження та недоліки аналізованих систем.

У роботі [9] розглядаються питання інтеграції сенсорів автоматичної ідентифікаційної системи (АІС) до системи управління рухом суден (СУРС). Обговорюються переваги, що виникають при інтеграції даних судових АІС до СУРС.

Питання управління судном в екстремальних умовах розглянуті в роботі [10]. Для цього слід зробити розрахунок впливу всіх зовнішніх сил, які стосуються управління судном у складних умовах.

У більшості сучасних систем управління складними динамічними об'єктами, як зазначається в роботі [11], для формування керуючих впливів використовується модель керованого об'єкта, для отримання якої використовуються нейронні мережі. Стверджується, що морські рухомі об'єкти і, зокрема, морські судна належать до класу невизначених об'єктів.

У роботах [12, 13] розглянуто проблеми забезпечення навігаційної безпеки судноводіння шляхом підвищення точності контролю та прогнозу місця судна.

Отже, сучасний стан проблеми показує, що потребують подальшого дослідження питання оцінки та прогнозування навігаційної ситуації під час руху судна в режимі реального часу. Можливі різні шляхи рішення цієї проблеми, одним з яких є розробка адаптивної нечіткої ситуаційної мережі. Така система дозволяє здійснювати можливий розрахунок траєкторій та визначення небезпечного зближення, що дозволяє підвищити безпеку судноплавства.

**Мета статті** полягає у підвищенні безпеки руху судна за рахунок удосконалення методів оцінки та

прогнозування навігаційної ситуації в єдиній концепції e-Navigation.

### Основна частина

Розглянемо місце розроблених в роботі моделей та методів у концепції e-Navigation в інтегрованій системі ходового містка (рис. 2).

Концептуальний аналіз різних аспектів безпеки судноплавства дозволяє оцінити поточну навігаційну ситуацію та виконати прогноз її розвитку на певному проміжку часу. При цьому необхідно врахувати, що безпека – динамічна категорія, що має множинну предметність залежно від конкретної сфери застосування.

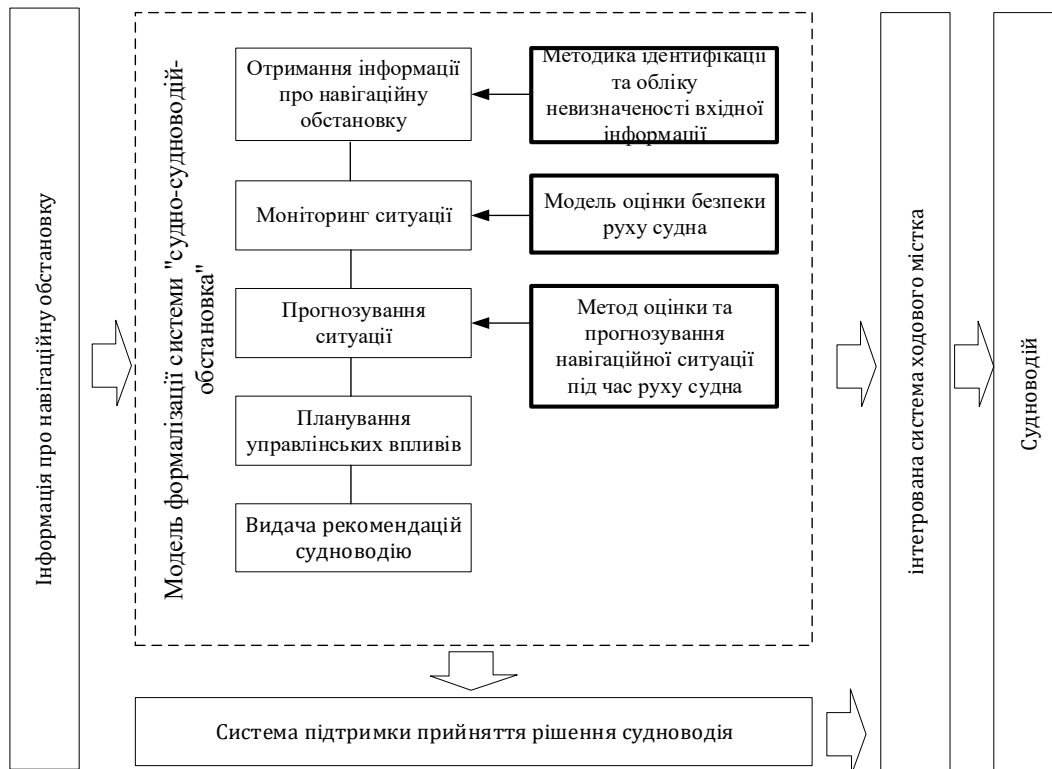


Рис. 2. Місце розроблених в роботі моделей та методів у концепції e-Navigation в інтегрованій системі ходового містка (джерело: розроблено автором)

Необхідність забезпечення безпеки судноплавства виникає при вирішенні протиріччя між запобіганням небезпечної ситуації та потребами управління судном: передбачати, запобігати, локалізувати та усувати збитки від впливу небезпеки [14]. Тому, поняття безпеки судноплавства має як об'єктивну, так і суб'єктивну сторону, оскільки оцінка її рівня проводиться судноводієм. Даний аспект зумовлює необхідність застосування лінгвістичних змінних для оцінки рівня безпеки. Тому для завдань оцінки комплексної безпеки руху судна застосовуємо критерій:

$$Cr = \prod_i (w_i \times cr_i), \quad (1)$$

де  $cr_i$  – частковий критерій;  $w_i$  – ваги за кожним окремим критерієм  $cr_i$ .

Згортка різномірних критеріїв використовує перехід від абсолютних значень критеріїв до відносних величин. Для цього фіксується шкала можливих значень для критеріїв та можливі межі зміни для кожного з них. Якщо діапазон значень знаходиться в межах  $[0; 1]$ , а девіація критерію  $cr_i$  лежать між  $cr_i^{\min}$  та  $cr_i^{\max}$ , то відносне значення можна подати так:

$$\bar{Cr} = \prod_i (cr_i - cr_i^{\min}) / (cr_i^{\max} - cr_i^{\min}). \quad (2)$$

В умовах складної навігаційної обстановки ускладненим є отримання інформації від судноводія та джерел інформації для отримання  $\bar{Cr}$ . Від судноводія може поступати, переважно, лише якісна інформацію про те, який із критеріїв є найбільш чи найменш значущим у даній ситуації, який із критеріїв може бути найгіршим, або погіршення якого яких небезпечно і т. д. Рівень комплексної безпеки руху судна ( $SFM$ ) відобразимо математичною моделлю, що характеризують стан системи "судноводій-судно-навігаційна обстановка" щодо безпеки людей, судна та вантажу.  $SFM$  можна задати матрицею:

$$SFM = \begin{pmatrix} cr_1 & t_1 & l_1 & tend_1 & V_1 \\ cr_2 & t_2 & l_2 & tend_2 & V_2 \\ - & - & - & - & - \\ cr_i & t_i & l_i & tend_i & V_i \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де  $tend_i$  – тенденція зміни  $i$ -го критерію (зростає, зменшується, не змінюється);  $V_i$  – швидкість зміни  $i$ -го критерію (низька, середня, висока);  $t_i$  – час характерний для  $i$ -го критерію;  $l_i$  – ступінь критичності негативних наслідків при реалізації ризиків, що погіршують значення  $i$ -го критерію.

Перші три стовпця матриці  $SFM$  є вектором часткових критеріїв безпеки та їх ваг. Вони описують поточний стан комплексної безпеки руху судна, що дозволяють оцінити навігаційну ситуацію у даний момент часу. Четвертий та п'ятий стовпець матриці показують динаміку зміни рівня безпеки, що дозволяє прогнозувати напрям розвитку навігаційної ситуації. Так можна оцінити рівень впливу кожного параметра на часткові критерії безпеки  $cr_i$  та ступінь прийнятності негативних наслідків  $l_i$ . Вплив загроз на безпеку руху судна можна описати через

$$Tr = \begin{pmatrix} tr_1^{l_1} \\ tr_2^{l_2} \\ - \\ tr_i^{l_i} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де  $tr_i^{l_i}$  – загроза, що може спричинити  $l_i$  негативний наслідок.

Однак сукупність заходів щодо запобігання загрозам дає змогу послабити вплив загроз на ступінь безпеки руху судна. Математично сукупність превентивних заходів  $Reac$  покажемо як:

$$Reac = \begin{pmatrix} reac_1^{tr_1} \\ reac_2^{tr_2} \\ - \\ reac_i^{tr_i} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

де  $reac_i^{tr_i}$  – превентивний захід на загрозу  $tr_i$ .

Елементи вектору  $Reac$  знижують ймовірність реалізації загроз  $Tr$ . Якщо, незважаючи на превентивні заходи попередження загроз під час руху судна, можлива реалізація певної множини загроз до виникнення негативних наслідків, то необхідно вжити заходів для їх локалізації та усунення.

Результуючий вектор остаточних загроз визначається за виразом:

$$Tr^{Reac} = Reac \times Tr. \quad (6)$$

Зауважимо, що ймовірність появи вторинних загроз зростає внаслідок неправильного розуміння навігаційної ситуації судноводієм та його дій під час виконання заходів щодо запобігання первинних загроз. Вони залежить від невизначеності інформації про поточну навігаційну обстановку. З первинними загрозами ми починаємо боротися ще до їхнього наступу, маючи можливість вплинути на сам факт їхньої появи. Вторинним загрозам запобігають, усуваючи причини, що їх викликають.

Загальний алгоритм аналізу комплексної безпеки під час руху судна наведений на рис. 3.

Таким чином, процес забезпечення безпеки руху судна передбачає вирішення двох взаємо-залежних завдань: аналіз навігаційної обстановки та зворотного завдання – управління впливом на систему.

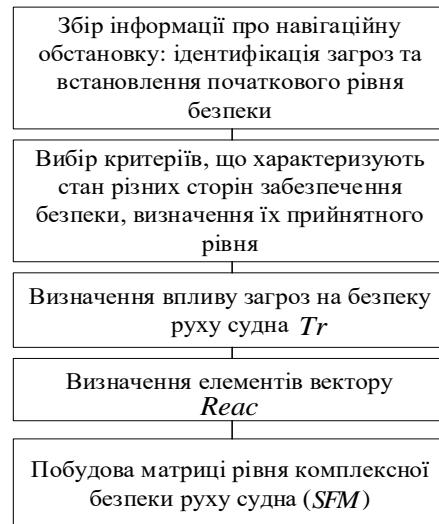


Рис. 3. Загальна структура алгоритму аналізу комплексної безпеки під час руху судна (джерело: розроблено автором)

При вирішенні першого завдання потрібно визначити значення критеріїв безпеки  $Cr$  та інтегрального критерію  $\overline{Cr}$  при заданих значеннях всіх параметрів, що впливають на них. Якщо існує не єдиний набір необхідних управлінських впливів, то на цьому етапі може виникнути задача оптимізації, яка полягає у знаходженні такої комбінації, яка забезпечує запобігання негативних факторів.

Для формалізації слабо структурованих процесів, прогнозування та підтримки прийняття рішень, часто застосовують математичний апарат нечітких множин. Перевагами перед іншими методами є можливість формалізації якісних характеристик параметрів, можливість застосування неповної, нечіткої і навіть суперечливої інформації.

Нечітка ситуаційна мережа (НСМ) – це нечіткий орієнтований зважений граф переходів по нечітким еталонним ситуаціям, та в загальному для завдань оцінки та прогнозування навігаційної ситуації він має такий вигляд:

$$S = \langle par, s^f, s^e, SFM, rule, u, adapt \rangle, \quad (7)$$

де  $par$  – множина нечітких ситуаційних ознак;  $SFM$  – рівень комплексної безпеки руху судна;  $s^f$  – поточна нечітка навігаційна ситуація;  $s^e$  – множина еталонних ситуацій;  $rule$  – множина правил відповідно до МПЗЗС-72, що активізуються в даний момент часу;  $u$  – управлінський вплив судноводія;  $adapt$  – правила адаптації НСМ, які полягають у зміні компонентів мережі (нечітких ознак, ситуацій, переходів) та його значень.

При цьому множина  $s^e$  еталонних ситуацій представляє собою набір певних ситуацій під час руху судна, якими можна керувати, покращуючи рівень безпеки судноплавства.

Формування нечіткої ситуації виконується так:

1) прийом оцінок безпеки руху судна у поточній ситуації;

2) перетворення оцінки у поточну нечітку ситуацію;

3) зіставлення поточної нечіткої ситуації з еталонними та пошук найближчої еталонної ситуації;

4) якщо ступінь рівності еталонної ситуації перевищує поріг довіри ( $\geq 0,6$ ), то формується керуюче рішення, характерне для подібної еталонної ситуації [15].

Визначимо поняття нечіткої навігаційної ситуації в області якісних значень та нечіткого логічного виведення (1):

$$s^f = \{\mu_s(par_i) / par_i\}, par_i \in Par. \quad (8)$$

Вибір міри близькості поточної нечіткої навігаційної ситуації  $s^f$  до еталонної  $s^e$  оцінюється як

$$\mu(s^f, s^e) = \bigcap_{par \in Par} (\mu_{s^f} \leftrightarrow \mu_{s^e}), \quad (9)$$

яке, згідно з визначенням нечіткої еквівалентності, має вигляд:

$$\mu(s^f, s^e) = \min \left( \begin{array}{l} \max(1 - \mu_{s^f}, \mu_{s^e}), \\ \max(1 - \mu_{s^e}, \mu_{s^f}) \end{array} \right). \quad (10)$$

У [16] обґрунтовано, якщо  $\mu(s^f, s^e) > 0,5$ , то ситуації можна вважати нечітко рівними, а при  $\mu(s^f, s^e) = 0,5$  – нечітко індиферентними.

Проте при порівнянні можливі випадки, коли дві або більше еталонних ситуацій матимуть ступінь рівності  $\geq 0,5$ . У цьому випадку алгоритмом має бути обрана ситуація з найбільшим значенням рівності. Але ймовірним є випадок, коли поточна нечітка навігаційна ситуація буде дорівнює двом чи більше еталонним ситуаціям. Тому, доповнимо кожне правило, що описує ситуацію, коефіцієнтом  $\alpha$  – ступенем переваги. Ступінь переваги дозволяє посилити вплив на вибір тієї чи іншої ситуації при зіставленні поточної нечіткої навігаційної ситуації з еталонними. З урахуванням ступеня переваги вираз (9) має вигляд:

$$\mu(s^f, s^e) = \bigcap_{par \in Par} (\mu_{s^f} \leftrightarrow \alpha \mu_{s^e}). \quad (11)$$

Тоді вираз (10) перетвориться на:

$$\mu(s^f, s^e) = \min \left( \begin{array}{l} \max(1 - \mu_{s^f}, \alpha \mu_{s^e}), \\ \max(1 - \alpha \mu_{s^e}, \mu_{s^f}) \end{array} \right). \quad (12)$$

Прив'язка навігаційної ситуації до управлінських впливів судноводія виконується за рахунок множини еталонних ситуацій, які, відповідно до режиму роботи ходового містка, діляться на підмножини штатних та критичних ситуацій, розбитих на групи відповідно до параметрів ситуації. Кожній основній групі (групі верхнього рівня ієрархії) ситуацій відповідає множина управлінських впливів.

Опис вузлів та переходів мережі, спосіб адаптації, а також описи еталонних ситуацій ґрунтуються на запропонованій моделі "судноводій-судно-навігаційна обстановка".

Після отримання від ДІ параметрів поточної навігаційної ситуації, побудова мережі проводиться циклічно – вибирається поточний вузол, що відноситься до поточного моменту часу, проводиться ідентифікація відповідного йому стану щодо груп еталонних ситуацій. Під час ідентифікації навігаційної обстановки для отриманої множини еталонних навігаційних ситуацій формується множини  $u$  та  $adapt$  щодо допустимих у кожній із ситуацій множин.

Метод оцінки та прогнозування навігаційної ситуації під час руху судна на основі нечіткої ситуаційної мережі показано на рис. 4.



Рис. 4. Метод оцінки та прогнозування навігаційної ситуації під час руху судна на основі нечіткої ситуаційної мережі (джерело: розроблено автором)

Так визначаються порядок допустимих впливів по кожному переходу між вузлами нечіткої ситуаційної мережі, формується загальний список дій. Для кожного переходу між еталонними ситуаціями формуються можливі результати всіх управлінських впливів та правил адаптації. Далі через кожен породжуваний варіант генерується новий вузол мережі, збережений для наступного часу відповідно до функцій, що описують результати застосування дій. У результаті дуга переходу розбивається на два відрізки – керований (груповий) перехід та некерований (частковий) перехід. Фрагмент нечіткої ситуаційної мережі, поданий на рис. 5.

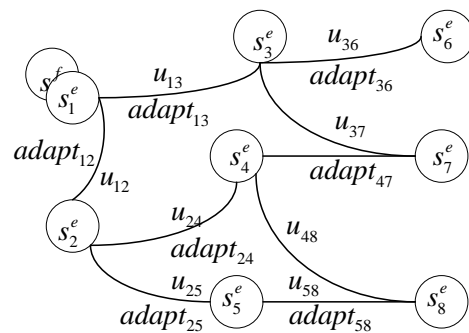


Рис. 5. Фрагмент нечіткої ситуаційної мережі (джерело: розроблено автором)

Перерахунок шляхів відбувається при зміні або додаванні нових дуг у граф мережі, а саме при



додаванні нового елемента множини управлінських впливів або при зміні рівня комплексної безпеки руху судна. При додаванні нової дуги відбувається заповнення множини еталонних ситуацій відповідно до модифікованого графа HCM.

Для цього виконується пошук у новому графі мережі нових оптимальних шляхів між усіма нечіткими навігаційними ситуаціями та занесення відповідних значень до множини  $z^e$ .

### Висновки

Удосконалено метод оцінки та прогнозування навігаційної ситуації під час руху судна, який, на відміну від відомих, базується на адаптивній нечіткій ситуаційній мережі, яка враховує параметри навігаційної ситуації, прогноз її розвитку та рівень комплексної

безпеки руху судна в єдиній концепції e-Navigation, що дозволяє підвищити безпеку судноплавства.

Запропоновано нечітку ситуаційну мережу, що характеризуються такими особливостями:

– можливістю гнучкої зміни компонентів мережі (нечітких ситуацій, параметрів, управлінських впливів) у процесі їх побудови та використання;

– способом урахування відносин впливу нечітких ситуаційних ознак один на одного при впливі на них керуючих рішень, що дозволяє типізувати оцінку такого впливу та, в результаті, спростити процедури побудови та адаптивної зміни мереж при моделюванні поведінки агентів;

– визначенням та вибором управлінських впливів та їх послідовностей відповідно до різних критеріїв та обмежень.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Варенич И.И., “Концепция e-Navigation – будущее безопасного мореплавания,” ОНМА Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека, сс. 109-111, 2014.
2. D. Patraiko, P. Wake, “E-Navigation and the Human Element,” Gdynia Maritime University, doi:10.1201/9780203869345.ch5, 2010
3. С.А. Шишкин, “Перспективы и проблемы реализации безэкипажного судоходства,” ХДМА Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті, сс. 18-21, 2017.
4. Вагущенко Л.Л. Системы автоматического управления движением судна/ Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. - Одесса: Латстар, 2002. - 310 с
5. Мальцев А. С. Маневрирование судов при расхождении / Мальцев А.С. – Одесса: МТЦ, 2002. – 208 с.
6. Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. Гибкие стратегии расхождения судов. Одесса: КП ОГТ, 2007. 424 с.
7. Вагущенко Л.Л. Судовые навигационно-информационные системы/ Вагущенко Л.Л. - Одесса: Феникс, 2004. - 302 с.
8. Ростопшин Д. Я. О проблемах использования данных автоматической идентификационной системы в задачах управления движением судов / Ростопшин Д. Я., Антонова Д. А. // Мехатрон. - 2007, No 9, прил., с. 9-14.
9. Вагущенко Л.Л. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности/ Вагущенко Л.Л., Вагущенко А.Л., Заичко С.И - Одесса: Феникс, 2005. -274 с.
10. Paulauskas V., Paulauskas D., Steenberg C. External forces influence on ships steering in extreme conditions. M. Transport Means 2006: Proc. of the 10 International Conference, Kaunas, Oct. 19-20, 2006. Kaunas: Technologija. 2006, p. 158-160.
11. Оськин Д. А. Система управления морским судном с использованием нейросетевой идентификационной модели / Оськин Д. А. // Вестн. Мор. гос. ун-та. 2008, No 27, с. 3-12
12. Ткаченко А.С. Применение обобщенных пуассоновских распределений для описания навигационных погрешностей / Ткаченко А.С., Алексишин В.Г.// Судовождение. – 2008. - No 15. – С. 93 – 99.
13. Мельник Е.Ф. Обоснование выбора критерия навигационной безопасности судовождения. *Судовождение*. 2002. № 5. С. 65–73.
14. Weyns D. Environments for Multiagent Systems. *The Knowledge Engineering Review*. 2005. T. 20, No 2. С. 127—141.
15. Weyns D., Holvoet T. A formal model for situated multi-agent systems // *Fundamenta Informaticae*. — Amsterdam, 2004. — Т. 63, No 2—3. — С. 125— 158. — ISSN 0169-2968
16. О.І. Кушлик-Дивульська, Б.Р. Кушлик. Основи теорії прийняття рішень. – К., 2014. – 94с

Received (Надійшла) 31.08.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.10.2022

### Method of assessing and forecasting the navigation situation during ship motion

O. Levchenko

**Abstract.** The article improves the method of assessing and forecasting the navigational situation during the movement of the ship, based on an adaptive fuzzy situational network, which takes into account the parameters of the navigational situation, the forecast of its development, and the level of comprehensive safety of the movement of the ship in a single concept of e-Navigation, which allows to increase the safety of navigation. The modern level of development of technology and navigation systems allows forecasting the development of the navigation situation with high accuracy and monitoring navigation objects. Modern positioning systems make it possible to obtain exact coordinates of navigation objects, a universal automatic information system makes it possible to transmit data to all traffic participants in real time, and with the help of adaptive forecasting models, it is possible to calculate trajectories and determine the danger of dangerous convergence, therefore this task is relevant. In the work, a fuzzy situational network characterized by. The ability to flexibly change network components during their construction and use. The work uses a theoretical method for researching e-Navigation projects. The issue of the state and prospects of the implementation of e-Navigation technology, which is one of the main initiatives of the International Maritime Organization, is being investigated. It is noted that despite the introduction of integrated systems of the running bridge, navigational errors due to the human factor are one of the main causes of marine accidents. An initiative is being considered, which provides for the creation of a digital infrastructure on the ship and shore segments, which provides data exchange and integration of existing and new marine navigation tools, which will allow the transition of navigation information to a digital format.

**Keywords:** ship, shipmaster, navigation situation, navigation systems, e-Navigation, fuzzy situational network.

О. А. Мураховська, Н. А. Українець

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

## АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТРАНСПОРТНОЇ КАТЕГОРІЇ

**Анотація.** Підвищення ефективності авіаційної техніки – це найважливіша умова розвитку як цивільної так і військової авіації. Тому розробка автоматизованих засобів для визначення ефективності літального апарату є актуальним завданням, рішення якого присвячена дана робота. **Мета даної роботи** полягає в тому, щоб проаналізувавши критерії, які можуть бути використані для оцінки ефективності літальних апаратів, а також їх зіставлення з ефективністю інших зразків авіаційної техніки або одного й того ж літального апарату при виконанні різних завдань, розробити критеріальну базу та алгоритм оцінки ефективності літального апарату транспортної категорії. Для наповнення критеріальної бази проведено аналіз літературних джерел, останніх досліджень та публікацій. Відібрано 14 найбільш цікавих і таких, що широко використовуються критеріїв економічної ефективності, які належать до різних класів, чим і визначається сфера їхнього використання. Здійснено їх класифікацію, а також описано найцікавіші особливості окремих критеріїв. Розроблено математичне та методичне забезпечення, алгоритми визначення економічної ефективності літального апарату для кожного критерію окремо, а також загальний алгоритм оцінки економічної ефективності літального апарату транспортної категорії. Апробацію розробленої критеріальної бази здійснено на прикладі двох важких далекомагістральних літаків транспортної категорії: Boeing 747–200В та С–5А, які відповідають класу літальних апаратів, що досліджується.

**Ключові слова:** критерій, показник ефективності, вартість, критерій ефективності, критеріальна база, алгоритм.

### Вступ

Задачі, що пов'язані з оцінкою ефективності літальних апаратів (ЛА), є досить складними, комплексними і залежать від безлічі найчастіше суперечливих факторів [1, 2]. Згідно з офіційною методикою [3] ефективність ЛА визначається за допомогою економічного ефекту. При визначенні економічної ефективності транспортного засобу та, зокрема, ЛА існують два напрямки. Автори одних методик є прихильниками відносних критеріїв ефективності [4] (наприклад, ефекту на одиницю витрат), інші віддають перевагу абсолютним показникам. Навряд чи подібне протиставлення є правомірним. В одних випадках раціонально застосовувати одні, в інших інші критерії. Наприклад, при виборі параметрів крила або інших характеристик [5] в якості критерію оптимізації можуть бути прийняті відносний показник паливної або економічної ефективності. В інших випадках може успішно виступати в цій якості абсолютна величина злітної маси. Зміна деяких параметрів крила призводить до збільшення маси конструкції, але (у певних межах) дозволяє мінімізувати злітну масу. Іншим прикладом є показники, що застосовуються при оцінці економічної ефективності літака, що проектується або експлуатується, в порівнянні з його аналогом. В цьому випадку як критерій може бути прийнятий як відносний показник собівартості експлуатації [6] або порогорентабельності літака, так і абсолютний показник прибутку (в останньому випадку для коректного дослідження необхідно застосовувати рівні умови виробництва, виражені, наприклад, через рівність питомої вартості літака, і рівні умови експлуатації (непрямі та інші витрати), при цьому зіставлення значень показників дозволить порівняти технічну або економічну досконалість літаків [7]. Чи можна віддавати перевагу відносним показникам та заперечувати переваги показників, що мають розмірність? Серед перших є прийнятні, але є і помилкові, наприклад, відносні значення маси порожнього

літака та його частин. Ці показники, як і вагова віддача, давно втратили значення критерію ефективності пасажирських літаків. Багато дослідників вважають корисним, а деякі «принципово можливим» формування єдиного для даної галузі техніки інтегрального (узагальненого) критерію [8]. Дійсно, було б непогано виконувати аналіз ефективності за одним критерієм, що сукупно оцінює характеристики літака, тим більше що і оптимізацію параметрів ведуть зазвичай за одним критерієм. Проте задача формування єдиного критерію всіх видів ефективності є дуже складною і поки що не отримала свого рішення.

Оцінка ефективності ЛА здійснюється на основі показників та критеріїв ефективності. Показник ефективності використання продукції – кількісна характеристика ступеня досягнення корисних результатів під час використання продукції конкретної експлуатаційної ситуації з урахуванням експлуатаційних витрат (ГОСТ 15467-79). Однак відповідно до [9] критерій і показник ефективності – не одне й те саме, критерій ефективності можна визначати як показник, що відображає ступінь об'єктивної можливості досягнення мети, він є узагальненим показником ефективності, але не всякий узагальнений показник ефективності є критерієм.

Отже, критерій ефективності ЛА – це показник, за числовою величиною якого виконується оцінка та порівняння результативності (ефективності) ЛА. Розробка автоматизованих засобів визначення економічної ефективності ЛА є актуальним завданням, рішення якого присвячена дана робота.

**Мета дослідження** – проаналізувати критерії, які можуть бути використані для оцінки ефективності ЛА, її зіставлення з ефективністю інших зразків авіаційної техніки, а також для оцінки ефективності одного й того самого ЛА при виконанні різних завдань; на основі відібраних у результаті селекції критеріїв ефективності ЛА розробити критеріальну базу та алгоритм оцінки економічної ефективності ЛА транспортної категорії.

### Викладення основного матеріалу

Розглянемо можливу (рис. 1) і, звичайно, не єдину класифікацію видів та критеріїв ефективності літака [5]. Частинні види критеріїв першого рівня мають обмежену сферу застосування.

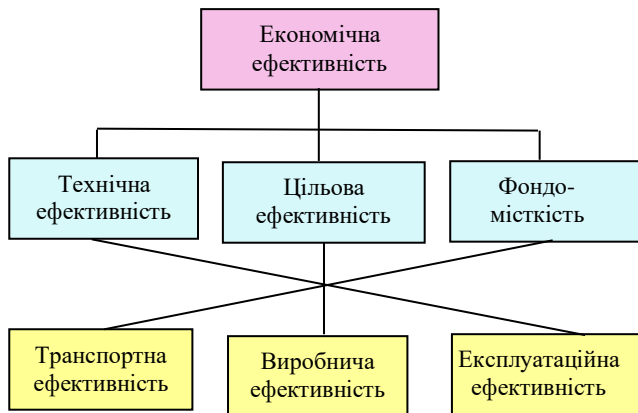


Рис. 1. Зв'язок видів та критеріїв ефективності літака

Транспортна ефективність залежить від технічних показників, таких як аеродинамічна якість, питома витрата палива тощо. Перевагою таких критеріїв є простота та наочність. Виробнича ефективність залежить від технологічності, взаємозамінності та інших властивостей конструкції [10]. Про цей вид ефективності можна судити з собівартості виробництва. Експлуатаційна ефективність залежить від таких показників як довговічність, надійність, ремонтосприможність тощо. Про цей вид ефективності судять за трудомісткістю обслуговування на одну годину польоту, собівартістю технічного обслуговування літака тощо. Більш складні види ефективності другого

рівня. Технічна ефективність літака оцінюється як собівартість тонно-кілометра. Тут враховуються специфічні чинники, що впливають на собівартість. Наприклад, час завантаження та розвантаження для вантажних літаків. Цільова ефективність відображає ступінь задоволення літаком тих потреб, для вирішення яких він створений. Фондомісткість – вимірюється вартістю літака та пов'язаних з ним інших засобів, необхідних для виконання у певний час заданого обсягу перевезень за інших рівних умов. Економічна ефективність – найзагальніший вид ефективності. Сутність оцінки економічної ефективності літака зводиться до зіставлення повних витрат на його створення з наступною економією поточних витрат праці з його використання.

Аналіз літературних джерел [3, 5, 8–15], присвячених методам визначення економічної ефективності ЛА, показав, що на даний час використовується значна кількість найрізноманітніших критеріїв, введених різними авторами; при цьому майже відсутні рекомендації щодо застосування кожного з них та рекомендовані значення цих критеріїв. Як виняток можна відзначити роботи [13,14], автори яких отримали удосконалену формулу для розрахунку узагальненого показника технічного рівня (критерій Протопопова), із застосуванням якого визначили та проаналізували технічний рівень далеких магістральних літаків цивільної авіації. Для наповнення критеріальної бази відібрано 14 найбільш цікавих критеріїв, що широко використовуються. Ці критерії відносяться до різних класів, що визначає сферу їх використання. На рис. 2 представлено класифікацію вибраних критеріїв ефективності. У табл. 1–3 наведено формули для розрахунків критеріїв та параметри, які необхідні для їх обчислення.

Таблиця 1 – Абсолютні узагальнені критерії економічної ефективності ЛА

№ критерія	Формула	Позначення	Параметр
1	$k = \frac{m_{кн}^2 V_p^2 L_{тех} \sqrt{H}}{m_0 \cdot 10^{16} \sqrt{V}}$ $A = m_{кн} V_p^2 L$ $[т \cdot км^3 / ч^2]$	$m_{кн}$	Маса комерційного навантаження (для пасажирських літаків $m_{кн} \cong 0,1 \cdot n_{нас}$ ), т
		$L_{тех}$	Технічна (задана гранична) дальність польоту, м
		$m_0$	Злітна маса, т
		$H$	Висота польоту, м
		$V_p$	Рейсова швидкість польоту, км/год
		$V$	Об'єм простору, описаного габаритними розмірами літака, м <sup>3</sup> (довжина * розмах * висота)
2	$k = \frac{m_{кн} V_p^2 L_{тех}}{m_m \cdot m_{н.сн} \cdot 10^6}$	$m_{кн}$	Маса комерційного навантаження, т
		$L_{тех}$	Технічна дальність польоту, м
		$m_m$	Маса палива, т
		$m_{н.сн}$	Маса порожнього спорядженого літака, т
3	$k_{к.э} = \frac{(C_{ч.а.} + C_{ч.р.м.}) \cdot 10^3}{n_{нас} \cdot V_p}$	$C_{ч.а.}$	Годинна норма амортизації літака з двигунами, \$
		$C_{ч.р.м.}$	Вартість годинної витрати палива, \$
		$m_{кн}$	Маса комерційного навантаження, т
		$V_p$	Рейсова швидкість польоту, км/год

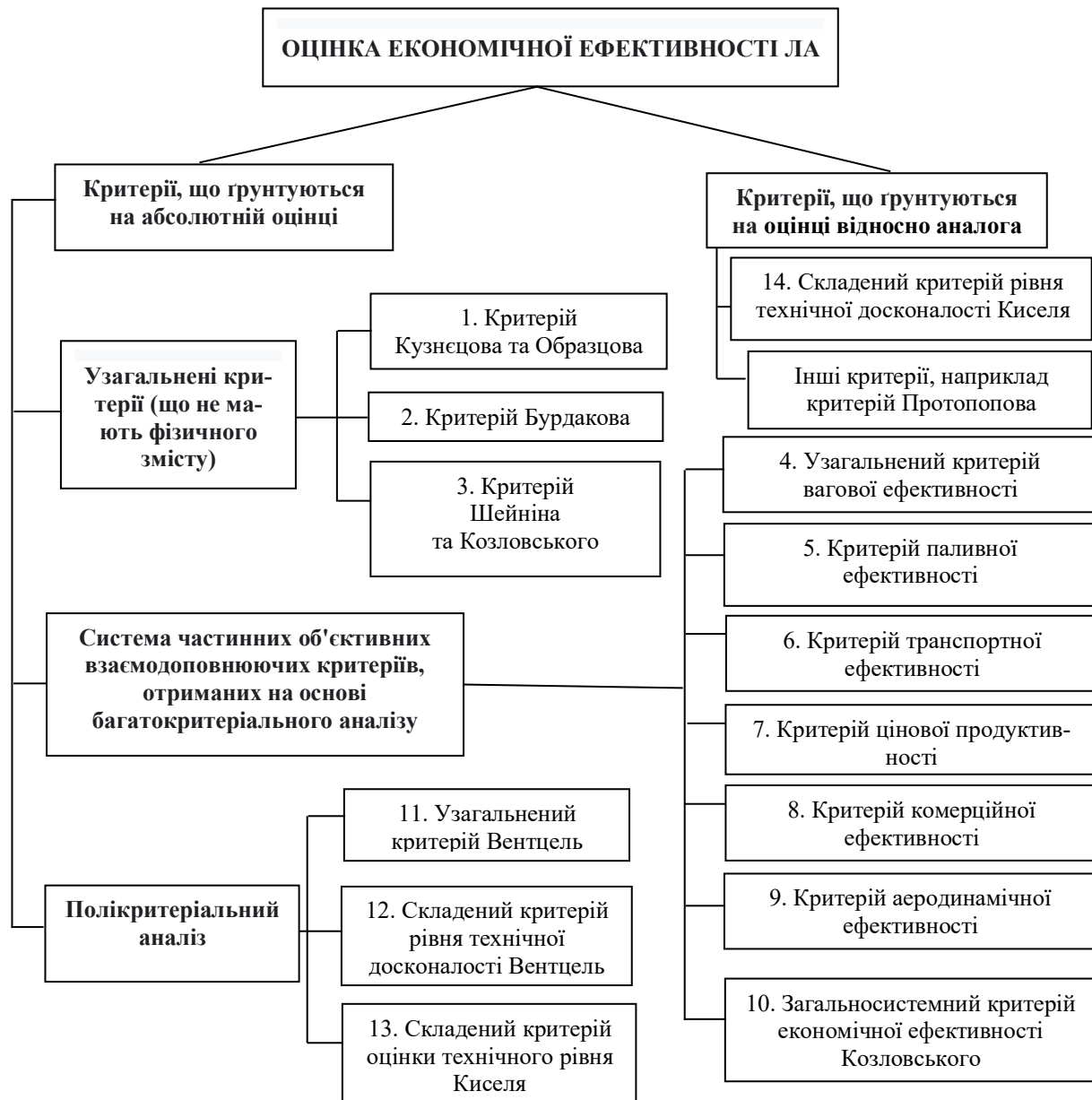


Рис. 2. Класифікація критеріїв ефективності ЛА

Таблиця 2 – Узагальнені критерії економічної ефективності ЛА

№ критерія	Формула	Позначення/Параметр
11	$k_{m,y} = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n}{\bar{k}_1 \cdot \bar{k}_2 \cdot \dots \cdot \bar{k}_m}$	$k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n$ – показники ефективності, що при підвищенні ефективності збільшуються; $\bar{k}_1 \cdot \bar{k}_2 \cdot \dots \cdot \bar{k}_m$ – показники ефективності, які з підвищенням ефективності зменшуються
12	$k_{m,y} = a_1 k_1 + a_2 k_2 + \dots + a_{i+1} \bar{k}_1 + a_{i+2} \bar{k}_2 + \dots + a_m \bar{k}_m$	$k_1, k_2, \dots, k_n$ – критерії, які з підвищенням ефективності виробу збільшуються, $\bar{k}_1, \bar{k}_2, \dots, \bar{k}_m$ – критерії, які з підвищенням ефективності виробу зменшуються, $a_1, a_2, \dots, a_n$ – додатні або від’ємні критерії, тобто ваги відповідного показника (встановлюються експертами для кожного конкретного випадку), причому $\sum_{j=1}^m a_j = 1,0$ .
13	$k_{m,y} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i k_i}{n}$	$x_i$ – частинні змінні показники, що характеризують значущість кожного з факторів, що аналізуються; $k_i$ – показники оцінки; $n$ – кількість показників, що використовується.
14	$k_{m,y} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{k_a}{k}$	$\alpha_i$ – коефіцієнти значущості окремих характеристик та критеріїв, за умови: $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1,0$ ; $k, k_a$ – значення критерію для аналізованого літака та для літака аналога.

Таблиця 3 – Абсолютні частинні критерії економічної ефективності ЛА

№ критерія	Формула	Позначення	Параметр
4	$k_{6.э} = \frac{m_{п.сн.}}{m_{кн} \cdot L_{тех}} = f(L_{тех})$	$m_{п.сн.}$	Маса порожнього спорядженого літака, т
		$m_{кн}$	Маса комерційного навантаження, т
		$L_{тех}$	Технічна дальність польоту, м
5	$k_{мэ} = \frac{m_m}{m_{кн} \cdot L_{тех}}$	$m_m$	Маса палива, т
		$m_{кн}$	Маса комерційного навантаження, т
		$L_{тех}$	Технічна дальність польоту, м
6	$k_{тр.эф} = \eta_V \frac{m_{кн} V_{кр}}{q_L \cdot m_{п.сн.}} = \frac{V_{рейс}}{V_{ср}} \cdot \frac{m_{кн} V_{кр} L}{m_m m_{п.сн.}}$ $\eta_V = \frac{V_p}{V_{ср}}; q_L = \frac{m_m}{L}$	$m_p$	Маса палива, т
		$m_{кн}$	Маса комерційного навантаження, т
		$L$	Відстань між аеропортами, км
		$m_{п.сн.}$	Маса порожнього спорядженого літака, т
		$V_{ср}$	Середня швидкість польоту, км/год
		$V_{рейс}$	Рейсова швидкість польоту, км/год
7	$k_{ц.нр} = \frac{Ц_c}{m_{кн} \cdot L_{тех}}$	$Ц_c$	Ціна літака, \$ млн
		$m_{кн}$	Маса комерційного навантаження, т
		$L_{тех}$	Технічна дальність польоту, м
8	$k_{к.э} = \frac{(A_{ч.а} + C_{ч.р.м.}) \cdot t_p \cdot 10^2}{m_{кн} \cdot L_{тех}}$ де $A_{ч.а} = \frac{Ц_c}{T_{ам} \cdot T_{гн}}$ – годинна амортизація літака та витрати на амортизацію, побічно пов'язані з $Ц_c$	$Ц_c$	Ціна літака, \$ млн
		$T_{ам}$	Час амортизації, роки
		$T_{гн}$	Річний наліт, годин
		$C_{ч.р.м.}$	Вартість годинної витрати палива, \$
		$t_p$	Тривалість рейсу, годин
		$m_{кн}$	Маса комерційного навантаження, т
9	$k_{а.э} = MK/C_p$	$M$	Число Маха (швидкість)
		$C_p$	Витрата палива двигунами, кг/км год
		$K$	Аеродинамічна якість
10	$\alpha = C/(C + E_H K)$ , якщо $\alpha > 1$ , то варіант ефективніший, чим більше значення $\alpha$ , тим ефективніший варіант. Якщо $\alpha < 1$ , варіант неефективний	$Ц$	Вартість тонно-кілометра перевезень
		$C$	Вартість одного літака
		$E_H$	Нормативний коефіцієнт ефективності капітальних витрат
		$K$	Питомі капітальні витрати (вартість літака та пов'язаних з ним наземних основних засобів, які припадають на рік на один тонно-кілометр перевезень)

Зупинимося на найцікавіших особливостях окремих критеріїв. У 80-х роках минулого століття П. Кузнецов та Р. Образцов з теоретичних міркувань запропонували новий критерій оцінки роботи транспорту – тран. Транспортна послуга в 1 тран дорівнює корисній роботі, витраченій на переміщення вантажу масою 1 тонна на відстань 1 км із середньорейсовою швидкістю руху 1 км/год. Розмірність трану [т · км<sup>3</sup>/ч<sup>2</sup>]. У роботі [11] автори особливого значення надають одиниці виміру тран у сучасних умовах розвитку логістичних систем з обслуговування ланцюгів поставок. У статті [12] автори наголошують на важливій ролі критерію тран, використання якого дозволяє отримати значний синергетичний ефект. Інженерний показник комерційної ефективності літака, запропонований В. М. Шейніним та В. І. Козловським у [5], являє собою собівартість тонно-кілометра, з якої вилучено всі експлуатаційні витрати та збережено ті статті витрат, на які впливають конструктори літаків та двигунів. Отже, у показнику зроблено спробу усунути вплив випадкових чинників, тобто

підвищити об'єктивність оцінки, властиву технічним показникам ефективності. Критерій паливної ефективності [8] є інтегральним, оскільки паливна ефективність залежить від аеродинамічної досконалості літака; газодинамічної досконалості двигунів; вагової досконалості конструкції, двигунів та систем обладнання; від застосування активних систем управління, більшість яких призводить до зниження витрати палива через зниження маси, конструкції та зменшення опору. Критерій паливної ефективності досить чутливий навіть до невеликих змін величин, що відображають перелічені властивості. Ще однією його особливістю є той факт, що паливна ефективність літаків, що зіставляються, визначається кінцевим значенням критерію лише за суворому збігу низки їхніх характеристик, передусім дальності польоту. Зі збільшенням дальності польоту кожного літака значення критерію зростає (оскільки літак на першому етапі польоту обтяжений паливом, що витрачається на наступній ділянці польоту, тому і витрачається додаткове паливо на першому етапі).

Критерій комерційної ефективності [8] відбиває дві основні статті витрат під час експлуатації літака – витрати на паливо і техніку, тобто лише ті економічні чинники, на які може вплинути авіаконструктор. Якщо згадати, що амортизаційні та інші витрати, пов'язані з вартістю літака, у сумі перевищують половину загальних (прямих) експлуатаційних витрат, то легко дійти висновку про доцільність оптимізації проєктувальних та конструктивних рішень на основі економічного критерію, зокрема критерію, що враховує два основні чинники паливної та економічної ефективності у їх взаємозв'язку. Для порівняння рівня технічної досконалості ЛА, що аналізує використовувати складовий критерій (№ 14). Тут можуть використовуватись будь-які критерії, наприклад,  $k_{TE}$  – критерій металоемності;  $k_{к.н}$  – коефіцієнт комерційного навантаження тощо. Коефіцієнти значущості  $\alpha$  визначаються експертною оцінкою або з аналізу впливів цих параметрів на економічну ефективність, з якою рівень технічної досконалості повинен бути узгоджений. Визначення критерію слід підпорядкувати певним умовам, до яких належать вибір аналога, раціонального числа та виду показників сумісності, а також приведення літака, що оцінюється, до аналога

Слід зазначити, що розглянутий підхід не є єдиним. В якості альтернативи можна запропонувати критерій Протопопова або його вдосконалену версію для визначення рівня технічної досконалості ЛА, запропоновану у статті [14].

Алгоритм визначення кожного з розглянутих вище критеріїв 1-11 економічної ефективності ЛА наведено на рис. 3. Загальний алгоритм оцінки економічної ефективності ЛА транспортної категорії показано на рис. 4. Користувачеві надано право вибору того чи іншого критерію або їх сукупності. Для зручності роботи йому надано можливість вибору спочатку методу визначення (на основі порівняння з аналогом або на основі використання абсолютного критерію), а потім у разі використання абсолютного критерію – вибору для оцінки будь-якого багатокритеріального, частинного або полікритеріального критерію або їх групи. Апробація розробленої критеріальної бази здійснена на прикладі двох важких далекомагістральних літаків транспортної категорії: Boeing 747-200В і С-5А (літаки обрані як відповідні класу, що вивчається, характерні і досить докладно описані у відкритій літературі [16]). Результати обчислень наведено у табл. 4.

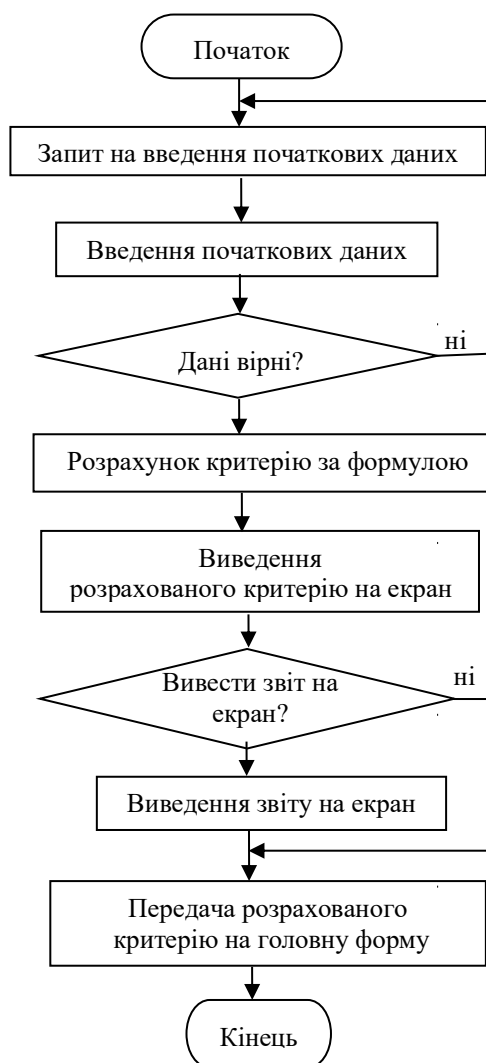


Рис. 3. Блок-схема алгоритму розрахунку критеріїв № 1-11

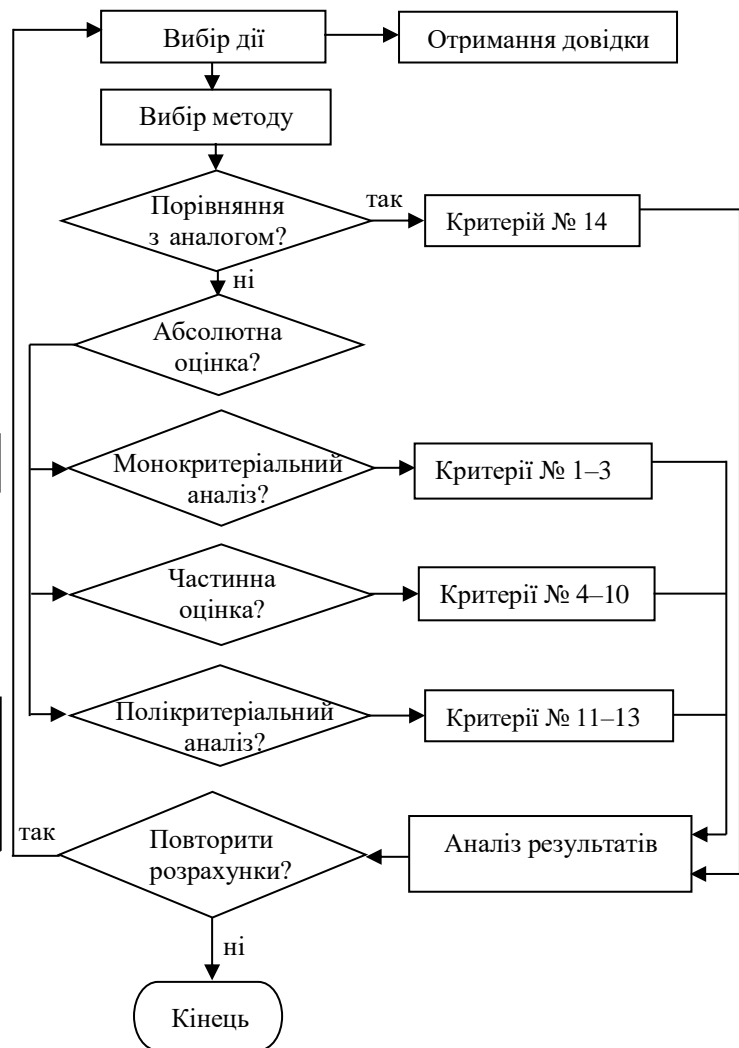


Рис. 4. Блок-схема загального алгоритму розрахунку оцінки економічної ефективності

Таблиця 4 – Результати обчислень

Критерій	Boeing 747-200B	C-5A
1	$4,876 \cdot 10^{14}$	$7,052 \cdot 10^{14}$
2	$0,028 \cdot 10^6$	$0,033 \cdot 10^6$
3	$0,733 \cdot 10^{-3}$	$0,527 \cdot 10^{-3}$
4	0,224	0,146
5	0,199	0,133
6	3,099	4,243
7	$4,18 \cdot 10^{-2}$	$3,343 \cdot 10^{-2}$
8	$0,85 \cdot 10^{-2}$	$0,76 \cdot 10^{-2}$
9	21,384	20,142
10	21,69	19,92
11	37,033	79,722
12	9,522	9,435
13	1,869	1,921

Окремо відзначимо, що складовий критерій рівня технічної досконалості Є. Н. Киселя літака Boeing 747-200B щодо літака C-5A, взятого як аналог, дорівнює  $-0,0737$ . Як зазначалося вище, у

літературі відсутні рекомендовані значення критеріїв. Програмна реалізація розробленої методики, дозволяє провести обчислення та дати рекомендації щодо значень розглянутих критеріїв економічної ефективності для літаків різних класів.

### Висновки

Проаналізовано та одноманітно описано критерії, які використовуються для оцінки ефективності ЛА, а також її зіставлення з ефективністю інших зразків авіаційної техніки або одного й того ж самого ЛА при виконанні різних завдань. Здійснено класифікацію критеріїв ефективності ЛА та на її основі розроблено критеріальну базу, математичне та алгоритмічне забезпечення для вирішення поставленого завдання. Надалі бажано доповнити критеріальну базу ймовірнісними критеріями ефективності ЛА, що дозволить використовувати її для розрахунку ефективності ЛА різних призначень і здійснити програмну реалізацію розробленої методики.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сланський О. В. Оцінка досконалості авіаційного навчально-бойового комплексу на попередніх етапах його проектування або подальшої модернізації. *Системи озброєння і військової техніки*. Харків: ХУПС, 2014. Вип. 3. С. 33–36
2. Шефер О. В., Лактіонов О. І., Михайленко О. В. Дослідження процесу прийняття рішень у складних технічних системах. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: ПНТУ, 2022. Т. 1 (67). С. 34–37.
3. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т., Т. 3. Москва: Машиностроение, 1988. 328 с.
4. Устименко Ю. А. Относительный критерий эффективности высокоскоростного летательного аппарата. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. Харьков: НАУ "ХАИ", 2019. Вып. 85. С. 151-166.
5. Шейнин В. М. Весовое проектирование и эффективность пассажирских самолетов / В. М. Шейнин, В. И. Козловский. – М.: Машиностроение, 1984. – 552 с.
6. Кібік О. М., Отливанська Г. А. Економіка та управління бізнес-структурою: Практикум. Одеса: НУ «ОЮА», 2021. 63 с.
7. Гаврись О. М., Розвиток методів економічної оцінки технічних рішень і якості промислових виробів: колективна монографія / М. О. Гаврись, О. О. Гаврись за заг. ред. проф. О. М. Гаврися. – Харків: Вид-во НТУ «ХП», 2021. – 163 с.
8. Шейнин В. М., Козловский В. И. Проблемы проектирования пассажирских самолетов. М.: Машиностроение, 1972, 308 с.
9. Голубев И. С. Эффективность воздушного транспорта / И. С. Голубев. – Москва: Транспорт. – 1982, 228с.
10. Проектирование гражданских самолетов: Теории и методы / И. Я. Катырев, М. С. Неймарк, В. И. Шейнин и др.; [под редакцией Г. В. Новожилова]. – М.: Машиностроение, 1991. – 672 с.
11. Котиков Ю. Г. Транспортная энергетика. Москва: Академия, 2006. 272 с.
12. Воскресенский И. В. Измеритель транспортной работы тран как альтернатива тонно-километрам. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmeritel-transportnoy-raboty-tran-kak-alternativa-tonno-kilometram>
13. Ефимов В. В., Чернегин К. О. Применение показателей технической эффективности и технического уровня для анализа функциональных свойств самолетов гражданской авиации. *Научный вестник МГТУ ЛА*, 2018, 21 (1). С. 185-194.
14. Ефимов В. В., Чернегин К. О. Совершенствование метода определения технического уровня самолетов гражданской авиации. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-metoda-opredeleniya-tehnicheskogo-urovnya-samoletov-grazhdanskoj-aviatsii>
15. Вентцель Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. – Москва: Советское радио. – 1972. – 552 с.
16. Концепции развития современной авиационной техники основных назначений / В. А. Богуслаев, А. И. Рыженко, Е. А. Мураховская, Р. Ю. Цуканов. Запорожье: Просвіта, 2020. 707 с.

Received (Надійшла) 14.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.11.2022

### Algorithm for determining efficiency assessment of transport category aircraft

O. Murahovska, N. Ukrainets

**Abstract.** Increasing the efficiency of aviation equipment is the most important condition for the development of both civil and military aviation. Therefore, the development of automated means for determining the economic efficiency of an aircraft is an urgent task, the solution of which is devoted to this work. The purpose of this work is to analyze the criteria that can be used to evaluate the effectiveness of aircraft, as well as its comparison with the effectiveness of other types of aviation equipment, or the same aircraft when performing various tasks. To develop a criteria base and an algorithm for assessing the economic efficiency of an aircraft of the transport category. To fill the criteria base, an analysis of literary sources, recent studies and publications was carried out 14 most interesting and widely used criteria of economic efficiency related to different classes have been selected, which determines the scope of their use. Their classification is carried out, and the most interesting features of individual criteria are described. Mathematical and methodological support, algorithms for determining the economic efficiency of an aircraft for each criterion separately, as well as a general algorithm for assessing the economic efficiency of a transport category aircraft have been developed. Approbation of the developed criterion base was carried out on the example of two heavy long-haul aircraft of the transport category: Boeing 747-200B and C-5A, corresponding to the class of aircraft under study.

**Keywords:** criterion, efficiency indicator, cost, efficiency criterion, criterion base, algorithm.

О. Ч. Огоро, С. О. Дмитрієв, М. Ю. Заліський, А. О. Осіпчук

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## МОДЕЛІ ДЛЯ АНАЛІЗУ НАДІЙНОСТІ АВІАЦІЙНИХ КОМПОНЕНТІВ, СИСТЕМ ТА КОНСТРУКЦІЙ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

**Анотація.** Основою для розробки програм технічного обслуговування повітряних суден є рекомендації виробника та директиви регулятора з льотної придатності. Регулятор зобов'язує експлуатантів повітряних судів слідувати керівним принципам, які в деяких випадках не відповідають фактичному використанню повітряних суден. Це приводить до більшої кількості робіт по технічному обслуговуванню, що є високовартісними. В цій статті, яка направлена на ефективне та економічне технічне обслуговування повітряних суден, представлена статистична модель аналізу надійності функціональних систем літака. Вихідними даними для моделювання використовувалися звіти пілотів та персоналу по технічному обслуговуванню. Розроблена модель була перевірена на адекватність з метою підтвердження її точності.

**Ключові слова:** технічне обслуговування, повітряне судно, аналіз надійності, функціональна система, інтенсивність відмов, модель відмов авіаційних систем.

### Вступ

Життєвий цикл повітряних суден (ПС) складається з чотирьох фаз: 1) етап проектування та розробки, що включає планування та концептуальний дизайн, попередній дизайн та системну інтеграцію; 2) етап виробництва та/або виготовлення; 3) етап експлуатації; 4) утилізація (списання). На етапі експлуатації компоненти та підсистеми зношуються, що зрештою призводить до відмови системи [1]. Технічне обслуговування (ТО) ПС проводиться для

зменшення або запобігання несприятливим наслідкам відмов та забезпечення максимальної готовності системи [2]. Ефективне ТО ПС спрямоване на забезпечення справного технічного стану (ТС) та забезпечення необхідних рівнів безпеки та надійності в експлуатації, а у разі відмови, ТО відновлює рівні показників безпеки та надійності до необхідних стандартів [3].

Дії по ТО (рис. 1) для компонентів і систем ПС поділяються на: коригуюче ТО, превентивне ТО та прогностичне ТО.

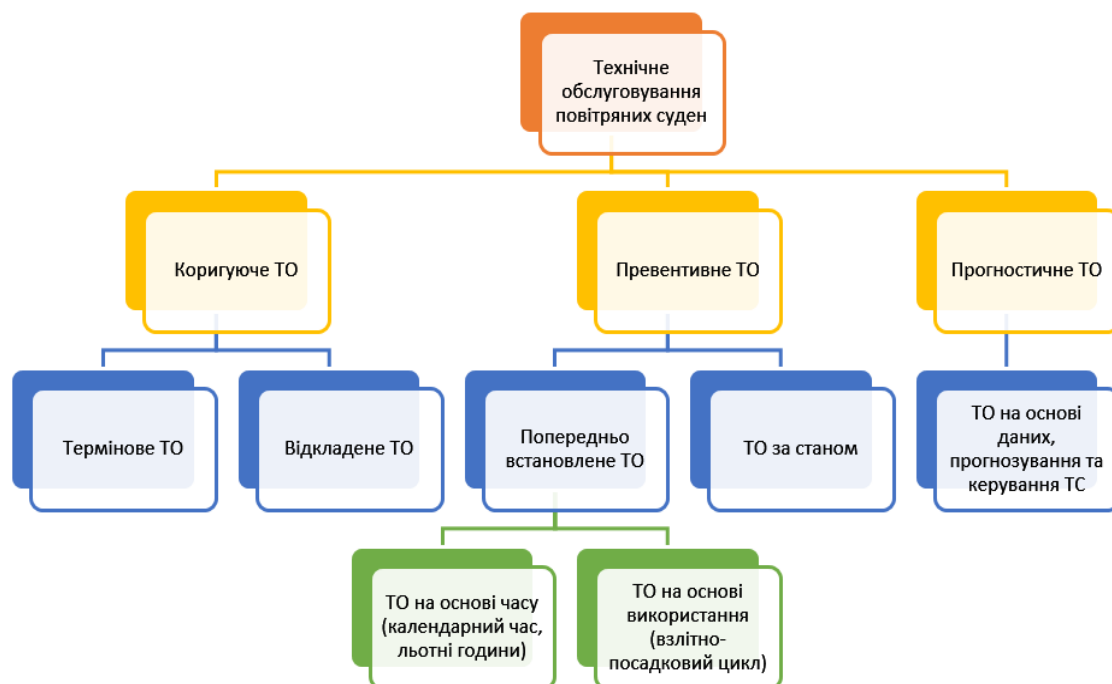


Рис. 1. Категорії технічного обслуговування повітряних суден

Коригувальне ТО охоплює всі дії щодо ремонту незапланованих несправностей та відмов. Превентивні дії щодо ТО зменшують кількість незапланованих ремонтів. Вони складаються з періодичних дій щодо ТО, щоб уникнути відмов та вихід з ладу компонентів та систем.

Прогностичне ТО використовує деякі параметри та технології оброблення даних, щоб визначити, коли може статися відмова, зменшуючи кількість незапланованих поломок та надаючи персоналу надійні варіанти планування превентивного ТО [4, 5].



Вимоги до ТО ПС встановлюються виробниками (ОЕМ), регулюючими органами та експлуатантами ПС у процесі, відомому як контрольна рада з технічного обслуговування (Maintenance Review Board MRB). Ці вимоги є основою розробки програм ТО ПС.

Структура програми ТО ПС зазвичай заздалегідь визначається виробником, але експлуатанти повинні адаптувати свою програму до відповідної конфігурації ПС і індивідуальним вимогам свого парку. З цієї причини програма ТО різних типів ПС на практиці різняться, але навіть з ідентичними типами ПС деталі програми ТО можуть відрізнятися в залежності від району експлуатації та використання або від індивідуального досвіду експлуатації [6].

Мета ТО полягає в тому, щоб надати обслуговуючому персоналу рекомендації щодо правил, процедур та обмежень щодо безпечного виконання обов'язків та відповідальності в областях та умовах, де проводиться ТО ПС, та відобразити потреби в ТО ПС, яких повинні дотримуватися для забезпечення безперервної безпечної роботи. Програма є частиною затвердженої системи технічного обслуговування. Програма ТО повинна перевірятись кваліфікованими інженерами на придатність не рідше одного разу на рік [7].

Аналіз надійності дозволяє експлуатантам ПС аналізувати дані про ПС та їх складові частини. Результати аналізу надійності можуть допомогти інженерам по ТО ПС скоригувати програму ТО у відповідності з фактичними вимогами, тим самим скоротивши надмірно дорогі дії по ТО і час простою. Експлуатант ПС також може порівняти надійність всього парку, щоб зрозуміти вартість порушення графіку, проаналізувати рішення і розставити пріоритети сервісних бюлетенів в залежності від впливу на парк [8].

**Аналіз надійності повітряних суден.** Для практичних цілей надійність визначається як здатність складової частини підсистеми або системи працювати відповідно до призначення без будь-яких відмов і в межах заздалегідь встановленого інтервалу часу в умовах усього життєвого циклу. З кількісної точки зору надійність зазвичай оцінюють як ймовірність того, що пристрій буде виконувати свою функцію протягом необхідного періоду часу в очікуваних умовах експлуатації та навколишнього середовища [9].

Аналіз надійності оцінює ймовірність відмови складових частин, підсистеми або системи при наявності випадкових подій. Інженерні проблеми зазвичай пов'язані з невизначеністю. Таким чином, статистичні методи надійності забезпечують потужні інструменти для обробки цих невизначеностей на основі функцій продуктивності або функцій граничного стану [10].

**Існуючі моделі технічного обслуговування повітряних суден, що орієнтовані на надійність.** Моделі ТО орієнтовані на аналіз надійності (RCM) дозволяють розраховувати показники надійності системи з урахуванням різних видів перевірок ТО та їх інтервалів, тим самим надаючи інформацію для

оптимізації експлуатаційних витрат, безпеки та надійності. Типова структура RCM включає збирання даних, включаючи середній час напрацювання на відмову та функцію частоти відмов, аналіз виду відмови та її наслідків, а також оптимізацію інтервалів превентивного ТО [11].

У роботі [12] запропоновано практичний підхід до аналізу надійності авіаційних систем на основі аналітичної моделі. Ця модель може використовуватися для визначення інтервалів ТО, оптимізації резервування системи та списку мінімального обладнання ПС.

Для оптимізації ТО авіадвигуна [13] запропоновано методологію, яка оцінює надійність авіаційного двигуна або його модуля з урахуванням параметрів моніторингу стану, звітів пілотів або статистичних даних експлуатантів. Середній час напрацювання на відмову розраховується з урахуванням цих результатів, а завдання обслуговування плануються з урахуванням часу виконання замовлення. Ці дії підвищують можливість впровадження принципів ощадливого виробництва та шести сигм при обслуговуванні ПС або авіаційних двигунів за допомогою RCM.

У роботі [1] була проведена оптимізація інтервалу превентивного ТО для індикаторів ПС за рахунок зниження очікуваної довгострокової вартості операцій на основі інформації про показники надійності ПС. Автори визначили основні види відмов від двох постачальників, використовуючи інформацію зі звітів аналізу режимів та наслідків відмов. Окрім того, було визначено показники середнього часу напрацювання на відмову (MTTF) та середнього часу між незапланованими замінами (MTBUR). У роботі [14] проведено порівняльний аналіз визначення показників надійності літальних апаратів вітчизняних та зарубіжних дослідників.

### Постановка задачі

Огляд літератури показує, що у дослідженнях, присвячених розробці стратегій RCM, існує прогалина в адекватних математичних моделях визначення характеристичної надійності авіаційних систем. Необхідність вирішення цієї проблеми обумовлена тим, що системи та компоненти ПС можуть мати характерні відмови, а їх надійність може змінюватись в залежності від попередніх планових перевірок та ремонтів.

Таким чином, види відмов системи є основою для оцінки впливу відмови на безпеку польоту та визначаються видами відмов компонентів та їх послідовністю виникнення.

Крім того, ПС зазвичай складається з мільйонів компонентів, які генерують великі мультимодальні дані на етапі експлуатації. Ця множина даних у режимі реального часу може бути використана як вхідні дані для алгоритмів статистичної обробки даних для аналізу надійності.

Моделі та алгоритми визначення показників надійності [15] можуть суттєво підвищити ефективність використання повітряних суден, а також інших складних систем.

## Методологія

Різноманітні розподіли ймовірностей використовуються для виконання різних видів ТО та досліджень надійності. На етапі експлуатації будь-якої системи, підсистеми або компонента найбільш поширеним розподілом ймовірностей є експоненційний розподіл, оскільки він легко застосовується у різних типах аналізу інтенсивності відмов компонентів, підсистем та систем протягом терміну їхньої служби. Імовірність безвідмовної роботи та готовності для цього розподілу визначається таким чином:

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \quad (2)$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}, \quad (3)$$

$$MTTR = \frac{1}{\mu}, \quad (4)$$

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt, \quad (5)$$

де  $R$  – імовірність безвідмовної роботи, що залежить від часу  $t$ ;  $\lambda$  – інтенсивність відмов;  $A$  – коефіцієнт готовності;  $\mu$  – інтенсивність проведення ремонту;  $MTBF$  – середнє напрацювання на відмову;  $MTTR$  – середній час ремонту.

Щільність розподілу ймовірності експоненційного розподілу визначається виразом

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \text{ для } t \geq 0, \lambda > 0, \quad (6)$$

де  $t$  – час,  $f(t)$  – щільність розподілу ймовірності (PDF) та  $\lambda$  – параметр розподілу, що в дослідженнях надійності відноситься до постійної частоти відмов [16]. Кумулятивна функція розподілу виражається як:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(y) dy. \quad (7)$$

Підставляючи рівняння (6) (7), отримуємо вираз для експоненціального розподілу кумулятивної функції розподілу

$$F(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda y} dy = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (8)$$

## Моделі для аналізу надійності авіаційних систем

У цьому дослідженні пропонується експоненційний розподіл несправностей/відмов авіаційних систем та конструкцій для розрахунку показників надійності. Для запропонованої моделі системи та конструкції НД були класифіковані відповідно до системи нумерації Асоціації повітряного транспорту (АТА). Вхідні дані  $n_T$  вилучаються зі звіту пілотів та персоналу ПС.

Номенклатура параметрів показана на рис. 2.

## Перелік параметрів та змінних, що використовуються в моделюванні

- A: матриця  $n_T$ ;
- a: додаткова змінна для розрахунку;
- i: індекс початкової матриці;
- j: додатковий індекс матриці;
- k: індекс матриці, отриманий при моделюванні;
- p: індекс кінцевої матриці;
- m: кількість спостережуваних компонент АТА;
- s: додаткова змінна для розрахунку;
- x: значення випадкової величини;
- V<sub>i</sub>: накопичена кількість спостережуваних несправностей/відмов у часі;
- C: випадкові числа експоненційного розподілу з параметром  $\lambda$ ;
- D<sub>k</sub>: часовий ряд спостережуваних несправностей/відмов;
- E<sub>k</sub>: випадкове число з рівномірним розподілом в діапазоні 0...1;
- F<sub>i,k</sub>: момент часу i-ої несправності/відмови системи;
- M: загальна кількість спостережуваних несправностей/відмов по всіх розділах АТА;
- N: кількість ітерацій;
- T: загальний час льотних годин на інтервалі спостереження;
- $\lambda$ : частота несправностей/відмов.

Рис. 2. Перелік параметрів та змінних

Вхідні дані  $n_T$  – це  $m \times 1$  матриця A. Функція B призначена для прийняття рішення про несправність/ відмову, у відповідності з класифікацією АТА.

Значення  $B_{i+1} - B_i$  відповідає ймовірності відмови i-го компонента.

Функція  $B_i$ , що відображає графік даних моніторингу (рис. 3), використовується для візуального аналізу того, як відбуваються відмови.

$$B_i = \sum_{j=0}^i A_j / M; M = \sum_{i=0}^m A_i; i = \{0 \dots m\}. \quad (9)$$

Час між несправностями/відмовами описується експоненційним розподілом з параметром  $\lambda$  і передбачається, що одночасно може статися лише одна відмова.

Щоб визначити, який компонент АТА несправний/відмовив, виконується розрахунок конкретної кількості відмов кожного компонента.

Моделювання методом Монте-Карло використовується для створення випадкових чисел з розміром вибірки  $N=10000$ ; ці числа мають рівномірний розподіл у діапазоні [0; 1].

Наступним кроком є обчислення часових рядів несправностей/ відмов  $D_k$ , що спостерігаються,

$$D_k = \sum_{j=0}^k C_j, \quad (10)$$

де  $C_j$  – експоненційний розподіл з параметром  $\lambda$ .

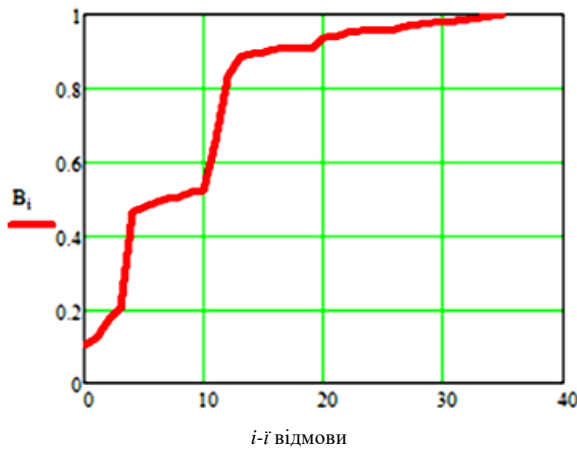


Рис 3. Графік даних моніторингу

Момент часу  $F$ , в який відбувається  $i$ -а несправність/відмова, визначається таким чином:

$$F_{0,k} = \begin{cases} D_k, & \text{if } E_k \leq 0, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (11)$$

$$F_{i,k} = \begin{cases} D_k, & \text{if } B_{i-1} < E_k < B_i, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Отриманий масив  $F$  є двовимірним та безпосередньо не може бути використаним для побудови графіків PDF, які необхідні для розрахунку параметрів надійності. Тому формується  $A_i$

$$A_i = \begin{cases} s \leftarrow 0 & \text{for } k \in 0..N-1, \\ \text{if } F_{i-1,k} \neq 0, a_s \leftarrow F_{i-1,k}, \\ s \leftarrow s+1. \end{cases} \quad (12)$$

Отримані PDF наносяться на графік та далі аналізуються параметри надійності –  $\lambda_i$ , MTBF<sub>i</sub> та  $K_{1000}$ .

Далі для перевірки точності застосовується критерій узгодження. Блок-схема статистичного моделювання представлена на рис. 4.

### Аналіз та результати

Для аналізу запропонованих моделей початкові дані для статистичного моделювання було вилучено зі звіту пілотів та персоналу ТО ПС у Нігерії, країні, розташованій у західноафриканському регіоні. Базова вибірка статистичних даних була отримана за трьома літаками MD-83 за чотирирічний період експлуатації [17]. Як показано в табл. 1, інформація про несправність/відмову кожної системи та конструкції ПС була згрупована відповідно до системи нумерації АТА.

У таблиці  $n_F$  відноситься до несправностей/відмов у польоті, а  $n_T$  відноситься до загальної кількості несправностей/відмов, що спостерігаються пілотами і обслуговуючим персоналом за інтервал часу.

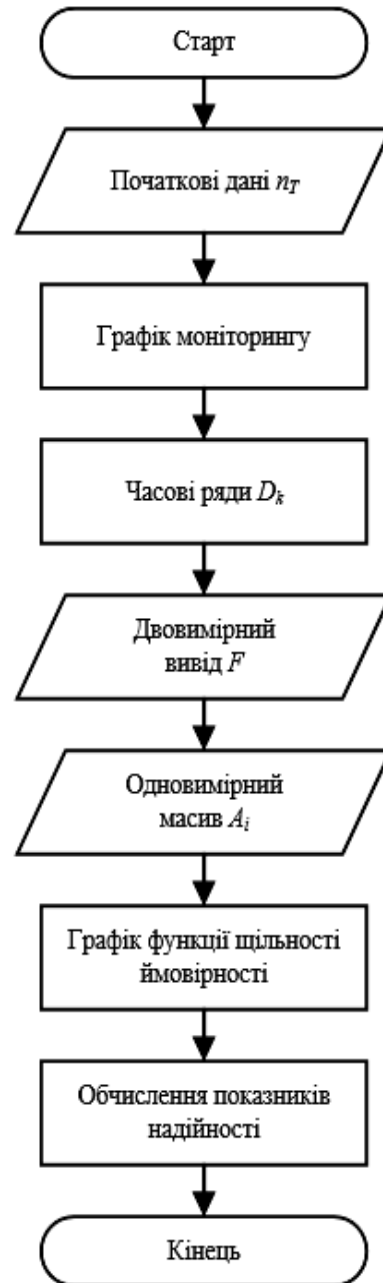


Рис. 4. Блок-схема алгоритму моделювання

Згідно з таблицею 1, системи кондиціонування повітря (АТА 21), зв'язку (АТА 23), шасі (АТА 32) та навігації (АТА 34) є найбільш стійкими до відмови. Отримані PDF показано на рис. 5-8.

Критерій згоди застосовується до математичної моделі, щоб перевірити, чи вона підкоряється експоненційному розподілу.

Критерій  $\chi^2$  був обраний для перевірки узгодження з використанням одного з отриманих PDF і в результаті було отримано таке значення:

$$\chi^2 = 13,531 .$$

Отримане значення  $\chi^2$  та менше порогового значення

$$\chi_{th}^2 = 19,675 .$$

Таблиця 1 – Інформація про несправності/відмови систем ПС

АТА №	Назва розділу АТА	<i>n<sub>T</sub></i>	<i>n<sub>F</sub></i>
21	Система кондиціонування повітря	734	670
22	Система автоматичного управління польотом	142	119
23	Система зв'язку	321	272
24	Система електроживлення	250	152
25	Побутове та аварійно-рятувальне обладнання	1869	1752
26	Система протипожежного захисту	85	38
27	Система управління літака	104	87
28	Паливна система	62	30
29	Гідравлічна система	52	32
30	Система захисту від льоду та дощу	77	67
31	Прилади індикації/запису	30	25
32	Шасі	965	209
33	Освітлення та світлова індикація	1239	613
34	Пілотажно-навігаційне обладнання	378	285
35	Кисневе обладнання	73	28
36	Пневматична система	30	27
38	Система водопостачання та видалення відходів	68	60
39	Електричні - електронні панелі та багатоцільові компоненти	1	1
45	Бортова система технічного обслуговування	1	1
46	Інформаційні системи	2	2
49	Бортова допоміжна силова установка	199	107
51	Конструкція планера	6	2
52	Двері, люки	113	104
53	Фюзеляж	8	1
56	Ліхтарі, вікна	26	22
57	Крило	3	2
71	Силова установка	28	22
72	Двигун	46	38
73	Паливна система двигунів	52	34
74	Система запалювання	12	5
75	Система відбору повітря	22	10
76	Система керування двигуном	18	13
77	Прилади контролю двигуна	29	24
78	Система вихлопу двигуна	21	13
79	Масляна система	37	25
80	Система запуску	40	29
Всього		1676	348

Тому гіпотеза про експоненційний закон розподілу середнього напрацювання на несправності/відмову систем та конструкцій літака приймається з рівнем значущості, що дорівнює 0,05.

Крім того, теоретичний експоненційний розподіл визначається як:

$$f(t) = \lambda_{calc} e^{-\lambda_{calc} t} \phi(t),$$

де  $\lambda_{calc}$  – частота несправностей/відмов, що розрахована на основі отриманого PDF для кожного розділу АТА,  $\phi(t)$  – функція Хевісайда.

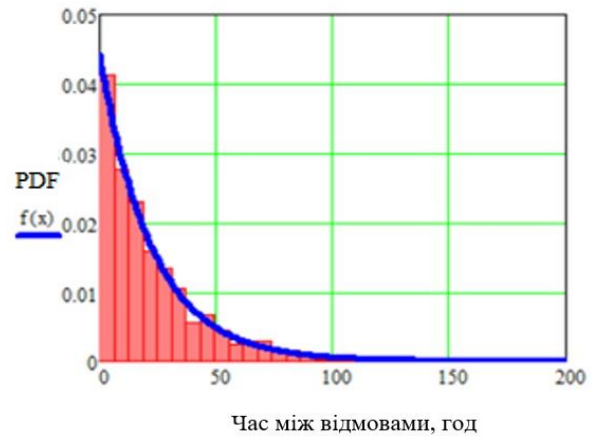


Рис. 5. Функція щільності розподілу ймовірності часу напрацювання між відмовами системи кондиціонування повітря

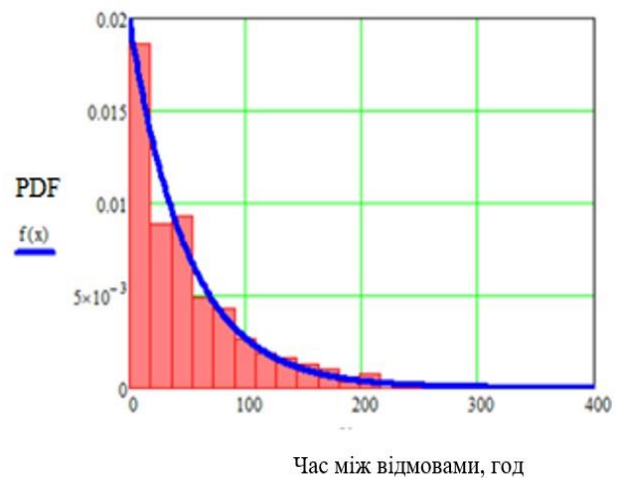


Рис. 6. Функція щільності розподілу часу напрацювання між відмовами системи зв'язку

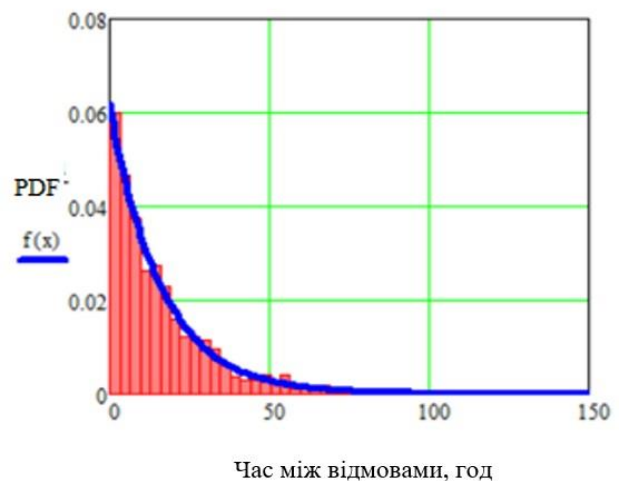


Рис. 7. Функція щільності розподілу часу напрацювання між відмовами системи шасі

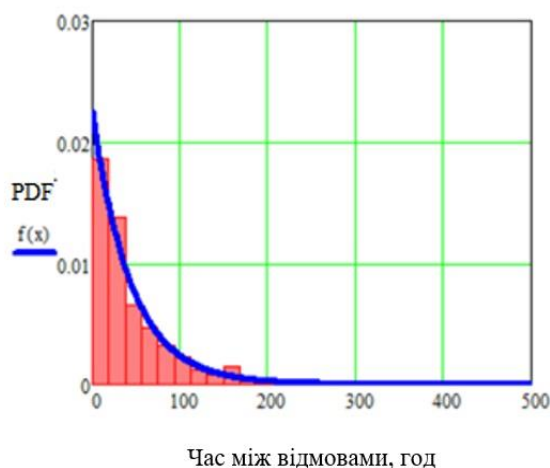


Рис. 8. Функція щільності розподілу часу напрацювання між відмовами навігаційної системи

## Висновок

У цій статті пропонується статистична модель для аналізу надійності авіаційних систем ПС у Нігерії з урахуванням ефективного ТО.

Перевагою запропонованої моделі є простота, що полегшує її використання обслуговуючим персоналом для планування робіт з технічним обслуговуванням.

Враховуючи, що вимоги до надійності визначаються на етапі проектування та розробки життєвого циклу ПС, запропонована модель може бути використана для вдосконалення нових та існуючих систем, підсистем та компонентів ПС.

Крім того, на основі інформації, наданої параметрами надійності, експлуатанти ПС можуть коригувати свої програми ТО ПС, щоб вони відображали фактичні вимоги.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Guo J., Li Z., Wolf J. Reliability centered preventive maintenance optimization for aircraft indicators. *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 2016, pp. 1-6.
- Dinisa D., Barbosa-Póvoa A., Palos Teixeira Â. A supporting framework for maintenance capacity planning and scheduling: Development and application in the aircraft MRO industry. *International Journal of Production Economics*, 2019, pp. 1-15.
- Hinsch M. *Industrial aviation management: A primer in European design, production and maintenance organizations*. Springer -Verlag GmbH Germany, 2019. 345 p.
- Celikmih K., Inan O., Uguz H. Failure Prediction of Aircraft Equipment Using Machine Learning with a Hybrid Data Preparation Method. *Scientific Programming Volume 2020*. Article ID 8616039. DOI: 10.1155/2020/8616039.
- Dhillon B. *Engineering maintenance: a modern approach*. CRC Press LLC, 2002, 222 p.
- Coutu A., Alblowi M.. ICAO Doc 9760 (Airworthiness Manual) 3rd Edition, 2014, 166 p.
- Bristow Nigeria S76C++ Maintenance Programme Issue 2. 2018.
- Ren H., Chen X., Chen Y. *Reliability Based Aircraft Maintenance Optimization and Applications*. Academic Press. 2017, pp. 1–3. DOI:10.1016/B978-0-12-812668-4.00001-0.
- Nakagawa T.. *Maintenance Theory of Reliability*. 2005, 269 p.
- Keshtegar B., Meng Z.. A hybrid relaxed first-order reliability method for efficient structural reliability analysis. *Structural Safety*, 2017, pp. 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2017.02.005>.
- Marwedel S., Reitmann J., Poupard M.. Platform for Aircraft Maintenance Services. United States Patent Application Publication No. US 2013/0073419 A, 2013. 15 p.
- Susova G. M., Petrov A.N., Gromov M.. *Markov Model-Based Reliability and Safety Evaluation for Aircraft Maintenance-System*, 1997.
- Shanmuganathan V.K., Haran A.P., Ragavendran S., Gayathri N. Aero-Engine Maintenance Cost Optimization by RCM. *Life Sci J* 2013, 10(1):2891-2896] (ISSN:1097-8135).
- Spinchenko I.V.. Comparative Analysis of Russian and Foreign Reliability Indexes for Aircraft. *Civil Aviation High Technologies*, Vol 9, 2014, pp. 50-53.
- Zaliskyi M., Petrova Y., Asanov M., Bekirov E. Statistical Data Processing During Wind Generators Operation. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, Vol. 8 (1), 2019, pp 33–38. <http://dx.doi.org/10.18178/ijeetc.8.1.33-38><http://dx.doi.org/10.18178/ijeetc.8.1.33-38>.
- Dhillon B. S. *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. New York, Taylor & Francis Group. 2006, 214 p. <https://doi.org/10.1201/9781420006780>.
- Okoro O.C. Reliability Analysis of Aircraft Fleet in Nigeria. *Proceedings of National Aviation University*. 2020, Vol. 83 (2), pp.49–53.

Received (Надійшла) 07.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.11.2022

## Model for reliability analysis for aviation components, systems and structures of aircraft

Onyedikachi Chioma Okoro, Serhii Dmytriiev, Maksym Zaliskyi, Alina Osipchuk

**Abstract.** Manufacturer recommendations and compliance with airworthiness regulator directives are base for the development of aircraft maintenance programs. The regulator obliges aircraft operators to follow guidelines that, in some cases, are inconsistent with the actual use of the aircraft. This results in more or less frequent maintenance work, which is costly. Aimed at efficient and cost-effective aircraft maintenance, this article presents a statistical model for analyzing the reliability of aircraft functional systems. The input data for the simulations were reports from pilots and maintenance personnel. The model was tested for adequacy to confirm its accuracy.

**Keywords:** maintenance, aircraft, reliability analysis, functional system, failure rate, aircraft system failure model.

В. Ю. Серебрянникова

Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна

## РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗСТАНОВКИ ПРІОРИТЕТІВ СИНТЕЗОВАНИХ ВАРІАНТІВ РІШЕНЬ ДЛЯ ОБГРУНТУВАННЯ ТИПУ БУДІВНИЦТВА (МОДЕРНІЗАЦІЇ) ПОВІТРЯНОГО СУДНА

**Анотація.** В роботі розроблено метод розстановки пріоритетів синтезованих варіантів рішень для обґрунтування типу будівництва (модернізації) повітряного судна. Розроблений метод базується на удосконаленому методі аналізу ієрархій, в якому обробляються не тільки точкові, а і нечіткі оцінки експертів. Використання удосконаленого методу аналізу ієрархій дозволяє враховувати ризики, можливості, витрати й очікуваний ефект вибору того чи іншого типу модернізації (будівництва) повітряного судна. Метод дозволяє розв'язувати задачі системного багатокритеріального розпізнавання, класифікації та ранжування слабо прогнозованих ситуацій, які є характерними при створенні й експлуатації модифікацій базових літаків. Перевагою методу є простота вибору експертів, які можуть оперувати при виставлянні оцінок термами природної мови.

**Ключові слова:** модифікація, повітряне судно, транспортна категорія, авіабудування, пасажирський літак, транспортний літак, авіаційна техніка, модернізація.

### Вступ

Виробники літаків та авіакомпанії, що їх експлуатують на ринку перевезень пасажирів і вантажів, функціонують у складних постійно змінюваних умовах. Оперативно реагувати на деякі зміни учасникам авіаційного бізнесу дозволяє створення й експлуатація модифікацій базових літаків.

Базовим літаком називають нову модель або новий тип, на основі якого розробляється одна модифікація або їх сімейство.

При створенні базового літака нової моделі, на відміну від модифікації, реалізується велика кількість нововведень, що призводить до вищої технічної досконалості, нового рівня техніки. У модифікації лише повторюються самі нововведення, без зміни рівня досконалості шляхом часткового вдосконалення, сфери застосування, цільового призначення або підвищення продуктивності. Модифікації створюються для отримання максимального прибутку літакобудівною галуззю шляхом задоволення попиту (потреби) ринку авіаперевезень за мінімальних витрат на проектування та виробництво.

Мета придбання модифікацій експлуатуючими компаніями – отримання максимального прибутку шляхом насичення ринку авіаперевезень пасажирів та вантажів за мінімальних експлуатаційних витрат.

Технічно вдосконалені модифікації повітряних суден (ПС) відрізняються від базового змінями, що не впливають на його економічну ефективність (підвищення надійності та безпеки різних систем обладнання і пристроїв забезпечення комфорту).

Економічно вдосконаленими є модифікації, в яких за результатами видозмін підвищується економічна ефективність. Проте всі модифікації здійснюються технічними засобами з метою зниження витрат (вартості виконання функцій модифікації) – економічний аспект.

Поділ на технічні та економічні модифікації доцільно замінити на однофакторні і багатфакторні (комплексні). Їх декомпозицією є доповнена множина модифікацій.

Залежно від зміни призначення літака розрізняють однорідні (зі збереженням призначення) та змішані модифікації. В свою чергу модифікації бувають частковими та комплексними.

Класифікація за виробничою ознакою передбачає розподіл модифікацій на дві основні групи – малі та глибокі модифікації, що відрізняються об'єктом конструктивних вимірювань.

Враховуючи різноманіття класифікацій модифікацій ПС, виникає необхідність в удосконаленні методу розстановки пріоритетів синтезованих варіантів рішень для обґрунтування типу будівництва (модернізації) ПС.

**Метою статті** є розробка методу розстановки пріоритетів синтезованих варіантів рішень для обґрунтування типу будівництва (модернізації) ПС.

**Аналіз літературних джерел.** Актуальність теми будівництва та модернізації повітряних суден зумовлена, в першу чергу, потребою всебічного обґрунтування впровадження модифікації конкретної моделі літака з метою економії коштів на етапі будівництва та поліпшення технічних характеристик. Це досягається автоматизацією процесу системного багатокритеріального розпізнавання, класифікацією та ранжуванням слабо прогнозованих ситуацій при обґрунтуванні типу будівництва (модернізації) ПС, послідовною оцінкою показників кожного альтернативного варіанта рішення.

Вартість розробки базового літака у 3...7 разів більша за вартість розробки модифікації. Отже, модифікації є однією з економічно ефективних форм розвитку авіаційної галузі, що стримує прогресуючу вартість літака і терміни впровадження інновацій. У теперішній час даний підхід фактично є єдиним способом активної присутності на регіональних і світовому ринках продажів авіаційної техніки в умовах сьогоденних економічних реалій.

Поява модифікацій відображає об'єктивні зміни у системі повітряного транспорту: зростання об'єму перевезень і щільності пасажирського потоку, поява нових ліній, необхідність у спеціалізації повітряних суден.

Як наслідок, питанню обґрунтування типу будівництва (модернізації) повітряного судна та його елементів присвячена низка робіт закордонних та вітчизняних авторів.

У статті [1] доведено актуальність розробки нових засобів ураження, забезпечення захисту літаків від сучасних засобів ураження ворога та модернізації авіоніки. Наведена низка аргументів на необхідність модернізації бойових літаків (МиГ-29 та Су-27 українських Повітряних Сил).

У роботі [2] наведено низку актуальних для України прикладів модернізації в КНР, з огляду на реалії вітчизняної економіки та загальних тенденції сучасного глобалізованого світу та ключових напрямків стратегії модернізації України.

У [3] запропонована узгоджена модель економічної доцільності модифікацій літальних апаратів, котра дозволяє ефективно вирішувати питання вартості, а саме економії при проектуванні та подальшому запуску в масове виробництво та експлуатацію літаків.

У статті [4] проаналізований досягнутий рівень модернізації літака третього покоління МиГ-21. Визначені можливості нової авіоніки та контейнерів, що підвищуються, щодо застосування високоточної зброї, розвідки та застосування завад.

Метод аналізу ієрархій має безліч варіантів та широко застосовується для вирішення завдань, пов'язаних із прийняттям рішень у різних сферах людської діяльності.

В роботі [5] запропоновано метод, що базується на нечіткій аналітичній ієрархії, спрямований на ефективне рішення проблеми усунення невизначеності та неточності в оцінці конкурентоспроможності авіакомпаній.

В роботі [6] обґрунтовано доцільність проведення інтеграції та розвитку технічних об'єктів, зокрема для військової авіації. В роботі розроблена концепція модернізації військової техніки (військового літака).

В роботі [7] розглянуто питання розробки та удосконалення нормативно-правової бази врегулювання питання розвитку промисловості виробництва безпілотних літальних апаратів, етапів проектування, розробки та модернізації.

Книга [8] присвячена розгляду проблемних питань та шляхів модернізації озброєння та воєнної техніки. Доведена важливість етапу модернізації озброєння, наведені показники, що впливають на ефективність та економічну практичність.

### Основний матеріал

Для прийнятті рішення щодо обґрунтування типу будівництва (модернізації) повітряного судна в умовах концептуальної невизначеності у роботі за базовий прийнято метод аналізу ієрархій [9].

Метод аналізу ієрархій є систематичною процедурою для ієрархічного подання елементів. При декомпозиції проблеми на складові виявляється відносний ступінь взаємодії елементів в ієрархії. Для обробки послідовності суджень осіб, що приймають рішення (ОПР), і їх чисельного вираження застосовується метод парних порівнянь.

Метод аналізу ієрархій містить процедури синтезу множинних суджень, отримання пріоритетності критеріїв та знаходження альтернативних рішень. Отримані значення є оцінками у шкалі відносин.

На практиці вирішення будь-якого завдання є процесом поетапного встановлення пріоритетів. Результати попереднього кроку використовуються як вхідні дані для вирішення наступного етапу. Фактично мова йде про реалізацію десизіонального аспекту знань у процесі вироблення рішень.

Характер зміни складових ознак області застосування повітряного судна, способів реалізації складових ознаки та комплексу засобів його реалізації наведено у табл. 1.

Способи та комплекси засобів реалізації складових ознаки зміни льотно-технічних характеристик повітряного судна наведені в табл. 2.

Способи та комплекси засобів реалізації складових ознаки ступеня технічної досконалості виконання повітряного судна наведені в табл. 3.

Способи та комплекси засобів реалізації складових ознаки підвищення економічної ефективності модифікацій повітряного судна наведено в табл. 4.

Метод поєднує сценарний підхід до оцінювання елементів системи й експертне оцінювання.

Він дозволяє розв'язувати задачі багатокритеріального системного розпізнавання, класифікації та ранжування слабо прогнозованих ситуацій, коли для прийняття рішень використовують лише суб'єктивні оцінки.

Удосконалений метод працює не тільки з точковими оцінками експертів, але і з нечіткими відносинами переваг на множині факторів. Тоді у загальну структуру прийняття рішень можна інтегрувати оцінювання не прогнозованих ситуацій при обґрунтуванні типу будівництва (модернізації) ПС й оцінювання показників кожного альтернативного варіанта рішення.

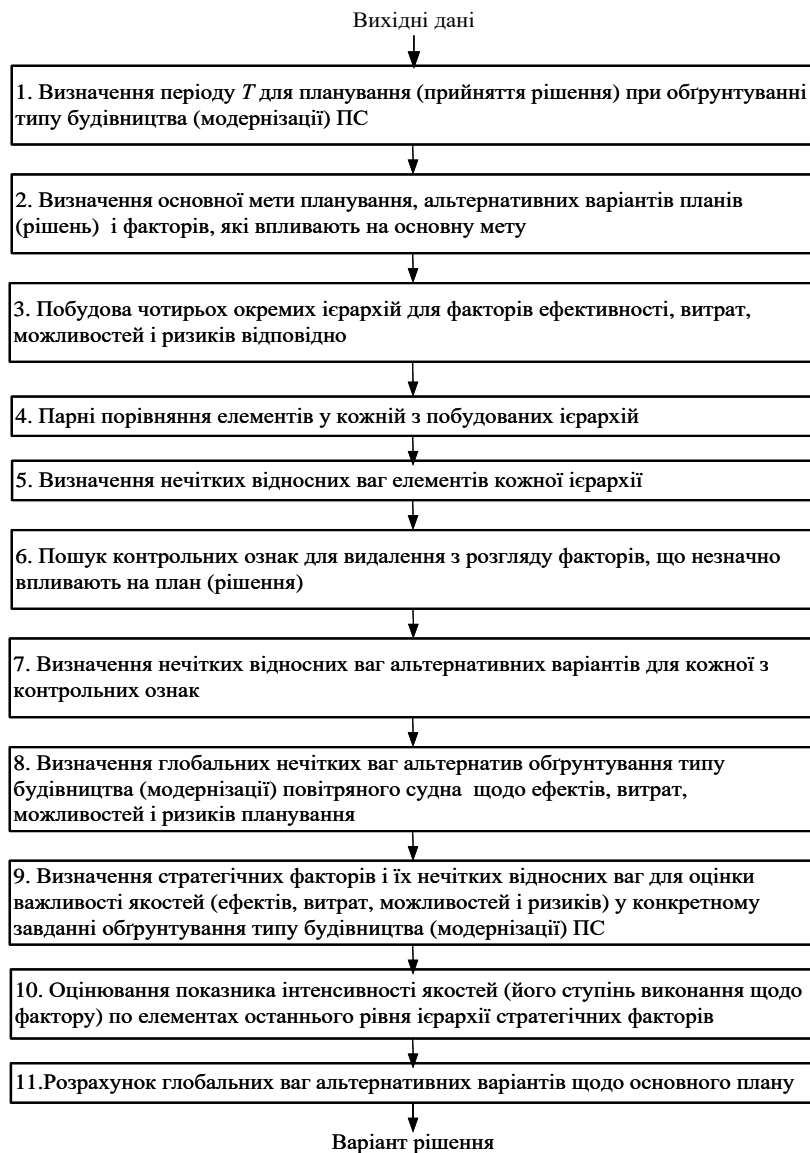
Наведемо послідовність етапів удосконаленого методу розстановки пріоритетів синтезованих варіантів рішень для обґрунтування типу будівництва (модернізації) повітряного судна (рис. 1).

Етап 1. Визначається період  $T$  для прийняття рішення. Він обумовлений як об'єктивними факторами необхідності прийняття рішення до настання деякого критичного моменту (часу планування), так і суб'єктивною оцінкою ОПР, яка відповідає рівню інформованості про процес проектування та будівництва повітряних суден. Спостереження процесу прийняття рішення в часі складається при необхідності перегляду ієрархічних структур щодо критеріїв формування системи протягом встановленого часового ресурсу  $T$ .

Етап 2. На цьому етапі визначаються: основна мета планування (прийняття рішення) при обґрунтуванні типу будівництва (модернізації) ПС  $G = \{g\}$ ,

альтернативні варіанти планів (рішень)  $A^t = \{A_i^t | i \in [1; N_a^t]\}$

фактори  $F^t = \{F_i^t | i \in [1; N_f^t]\}$ , які впливають на основну мету для реального моменту часу  $T_t \in T$ .



**Рис. 1.** Структура удосконаленого методу розстановки пріоритетів синтезованих варіантів рішень для обґрунтування типу будівництва (модернізації) повітряного судна

**Таблиця 1 – Характер зміни складових ознак області застосування повітряного судна, способів реалізації складових ознаки та комплексу засобів його реалізації**

Номер коду, найменування складової ознаки	Характер зміни складової ознаки	Спосіб реалізації зміни складової ознаки	Комплекс засобів реалізації способу зміни складової ознаки
1 – ПС місцевих ліній (МЛ)	1. (МЛ)→(БМ) 1→2	1 – зміна потужності СУ	1 – збільшення потужності СУ (заміна СУ) (N <sub>дв</sub> ↑)
2 – ближньо-магістральне ПС (БМ)	2. (БМ)→(МЛ) 2→1	1 – зміна потужності СУ 2 – зміна польотної маси	1 – зниження потужності СУ (заміна СУ) (N <sub>дв</sub> ↓) 2 – зниження польотної маси шляхом зменшення класу вантажомісткості (n <sub>пм</sub> ↓)
3- середньо-магістральне ПС (СМ)	3. (БМ)→(СМ) 2→3	1 – зміна потужності СУ 2 – зміна польотної маси 3 – зміна аеродинаміки	1 – збільшення потужності СУ (заміна СУ) (N <sub>дв</sub> ↑) 2 – зниження польотної маси шляхом зменшення класу вантажомісткості (n <sub>пм</sub> ↓) 3 – зниження профільного аеродинамічного опору (заміна крила) (C <sub>x</sub> ↓)
4 – далеко-магістральне ПС (ДМ)	4. (СМ)→(ДМ) 3→4	те саме	те саме
	5. (СМ)→(БМ) 3→2	1 – зміна потужності СУ 2 – зміна польотної маси	1 – зниження потужності СУ (заміна СУ) (N <sub>дв</sub> ↓) 2 – збільшення польотної маси шляхом збільшення класу вантажомісткості (n <sub>пм</sub> ↑)
	6. (ДМ)→(СМ) 4→3	1 – зміна потужності СУ 2 – зміна польотної маси	те саме



Таблиця 2 – Способи та комплекси засобів реалізації складових ознаки зміни льотно-технічних характеристик повітряного судна

№ п/п	Найменування складових ознаки	Спосіб зміни складових ознак	Комплекс засобів реалізації складових ознаки
1	Зміна максимальної швидкості польоту $V_{\max}$	1 – збільшення $V_{\max}$	1 – заміна двигуна на потужніший ( $N_{\text{дв}} \uparrow$ ) 2 – зниження пасажиро-вантажомісткості ( $n_{\text{пм}} \downarrow$ ) 3 – зниження профільного опору ( $C_x \downarrow$ )
		2 – зниження $V_{\max}$	4 – заміна двигуна на менш потужний ( $N_{\text{дв}} \downarrow$ ) 5 – збільшення пасажиро-вантажомісткості ( $n_{\text{пм}} \uparrow$ )
2	Зміна крейсерської швидкості $V_{\text{крейс}}$	3 – збільшення $V_{\text{крейс}}$	1 – заміна двигуна на потужніший ( $N_{\text{дв}} \uparrow$ ) 2 – зниження пасажиро-вантажомісткості ( $n_{\text{пм}} \downarrow$ ) 3 – зниження профільного опору ( $C_x \downarrow$ )
		4 – зниження $V_{\text{крейс}}$	4 – заміна двигуна на менш потужний ( $N_{\text{дв}} \downarrow$ ) 5 – збільшення пасажиро-вантажомісткості ( $n_{\text{пм}} \uparrow$ )
3	Зміна максимальної дальності польоту $L_{\max}$	5 – збільшення $L_{\max}$	1 – заміна двигуна на потужніший ( $N_{\text{дв}} \uparrow$ ) 2 – зниження пасажиро-вантажомісткості ( $n_{\text{пм}} \downarrow$ ) 3 – зниження профільного опору ( $C_x \downarrow$ )
4	Зміна статичної стелі $H_{\text{стат}}$	6 – збільшення $H_{\text{стат}}$	те саме
5	Зміна скоропідйомності $V_{y \max}$	7 – збільшення $V_{y \max}$	3 – зниження профільного опору ( $C_x \downarrow$ )
6	Зміна радіуса віражу $r_{\text{вир}}$	8 – зменшення $r_{\text{вир}}$	1 – заміна двигуна на потужніший ( $N_{\text{дв}} \uparrow$ )
7	Зміна довжини розбігу перед зльотом $L_{\text{розб}}$	9 – зменшення $L_{\text{розб}}$	1 – заміна двигуна на потужніший ( $N_{\text{дв}} \uparrow$ ) 2 – зниження пасажиро-вантажомісткості ( $n_{\text{пм}} \downarrow$ ) 3 – зниження профільного опору ( $C_x \downarrow$ )
8	Зміна довжини ЗПС $L_{\text{ЗПС}}$	10 – зменшення $L_{\text{ЗПС}}$	те саме

Таблиця 3 – Способи та комплекси засобів реалізації складових ознаки ступеня технічної досконалості виконання повітряного судна

№ п/п	Найменування складових ознаки	Спосіб реалізації складових ознак	Комплекс засобів реалізації складових ознаки
1	Надійність ступеня технічної досконалості систем обладнання	1 – підвищення безвідмовності систем обладнання	1 – конструктивно-технологічне доведення систем обладнання у процесі виробництва й експлуатації ПС 2 – використання систем обладнання, що забезпечують нормоване значення коефіцієнтів ОТ
		2 – підвищення ремонтпридатності систем обладнання	1 – удосконалення комплексу засобів ремонтпридатності обладнання
		3 – підвищення довговічності систем обладнання	1 – розробка засобів підвищення довговічності систем обладнання в експлуатації ПС
		4 – підвищення зберігання систем обладнання	1 – впровадження засобів підвищення зберігання систем обладнання ПС в експлуатації
2	Системи забезпечення безпеки ПС	1 – підвищення безпеки ПС конструктивними заходами	1 – конструктивно-технологічні комплекси засобів підвищення безпеки ПС
		2 – підвищення безпеки ПС експлуатаційними заходами	1 – експлуатаційні комплекси засобів підвищення безпеки ПС
3	Пристрої забезпечення комфорту в салонах ПС	1 – підвищення комфорту в салонах ПС конструктивними заходами та способами	1 – конструктивні комплекси засобів підвищення комфорту у салонах ПС
		2 – підвищення комфорту експлуатаційними заходами	1 – комплекс засобів підвищення рівня сервісу у польоті ПС
4	Експлуатабельність ПС	1 – удосконалення вантажно-розвантажувальних способів експлуатаційного обладнання та заходів	1 – комплекси засобів забезпечення вдосконалення обладнання та пристроїв при завантаженні та вивантаженні пасажирів та багажу конструктивно-технологічними рішеннями

Таблиця 4 – Способи та комплекси засобів реалізації складових ознаки підвищення економічної ефективності модифікацій повітряного судна

№ п/п	Найменування складових ознаки	Спосіб реалізації складових ознак	Комплекс засобів реалізації методу
1	Пасажиромісткість салонів ПС	1 – збільшення пасажиромісткості ПС 2 – зменшення пасажиромісткості ПС	1 – комплекс засобів, що забезпечують перекомпонування салону зі зміною відстані між кріслами та класності крісел 2 – комплекс засобів зменшення кількості паса-жирів, підвищення класності салонів до VIP-рівня
2	Вантажопідйомність ПС	1 – збільшення об'єму салону ПС	1 – комплекс засобів, що забезпечують збільшення довжини фюзеляжу або його ширини
3	Продуктивність реалізації	1 – збільшення продуктивності ПС	1 – комплекс засобів збільшення продуктивності зміною умов експлуатації ПС; 2 – заміна двигунів більш економічними
4	Ресурс ПС	1 – збільшення ресурсу планера ПС	1 – комплекс засобів збільшення ресурсу шляхом застосування ефективних конструктивно-технологічних рішень вузлів, з'єднань та заміни конструкційних матеріалів з високою втомною міцністю
5	Зниження витрати пального	1 – забезпечення зниження витрати палива вдосконаленням двигуна і силової установки ПС	1 – комплекс засобів зниження витрати палива заміною двигуна 2 – комплекс засобів, що забезпечують зниження аеродинамічного опору ПС

Елементи останніх рівнів ієрархій (ефектів, витрат, можливостей і ризику) плану, які характеризуються значимими відносними вагами, стають контрольними ознаками. Для їх пошуку і виділення встановлюється поріг значимості ваг. Якщо вага елемента перевищує поріг, то він є контрольною ознакою, в іншому випадку – ні. Це дозволяє видалити з розгляду ті фактори, що незначно впливають на план (рішення).

Етап 3. Проводиться класифікація  $F^\tau$  на чотири групи факторів:

–  $F_B^\tau$ , які визначають ефективність від реалізації плану (рішення)  $F_B^\tau = \{F_{B_j}^\tau | j \in [1; N_B^\tau]\}$ ;

–  $F_C^\tau$ , які визначають витрати для реалізації плану (рішення)  $F_C^\tau = \{F_{C_j}^\tau | j \in [1; N_C^\tau]\}$ ;

–  $F_O^\tau$ , які визначають невизначені можливості, що можуть виникнути в результаті реалізації плану (рішення)  $F_O^\tau = \{F_{O_j}^\tau | j \in [1; N_O^\tau]\}$ ;

–  $F_R^\tau$ , які визначають ризики, що впливають на процес і результат реалізації плану (рішення)

$$F_R^\tau = \{F_{R_j}^\tau | j \in [1; N_R^\tau]\}.$$

За результатами будуються чотири окремі ієрархії для факторів ефективності, витрат, можливостей і ризиків –  $H_B^\tau, H_C^\tau, H_O^\tau, H_R^\tau$ , відповідно. Фактори  $F_B^\tau, F_C^\tau, F_O^\tau, F_R^\tau$  розглянутих якостей створюють перші рівні ієрархій. Ознаки, які характеризують перераховані вище фактори, синтезують наступні рівні відповідних ієрархій.  $p_B^\tau, p_C^\tau, p_O^\tau, p_R^\tau$  – кількість рівнів в ієрархії ефективності, витрат, можливостей і ризиків відповідно, а  $N_{B_k}^\tau, N_{C_k}^\tau, N_{O_k}^\tau, N_{R_k}^\tau \in \mathbb{N}$  – кількість елементів  $k$ -го рівня ієрархії ефектів, витрат, можливостей і ризиків відповідно.

Етап 4. Виробляються парні порівняння елементів у кожній з побудованих ієрархій. Експерти дають оцінки у вигляді нечітких відносин переваг, коли оперують не числами, а природними термінами мови: "більше", "менше", "гірше", "набагато гірше", "краще", "набагато краще".

Етап 5. На даному етапі методу визначаються нечіткі відносні ваги елементів кожної ієрархії.

$w_{R_k}^\tau = w_{R_{kj}}^\tau | j \in [1; N_{R_k}^\tau]$  – вектор ваг елементів  $k$ -го рівня ієрархії ризиків будівництва (модернізації) повітряного судна в момент часу  $T_\tau \in T$ ,  $w_{C_k}^\tau = w_{C_{kj}}^\tau | j \in [1; N_{C_k}^\tau]$ ,  $w_{B_k}^\tau = w_{B_{kj}}^\tau | j \in [1; N_{B_k}^\tau]$ ,  $w_{O_k}^\tau = w_{O_{kj}}^\tau | j \in [1; N_{O_k}^\tau]$  – вектори ваг елементів  $k$ -го рівня для ієрархій ефектів, витрат і можливостей системи відповідно. Вектори ваг є нечіткими і можуть бути розраховані з використанням методів обробки нечіткої експертної інформації в методі аналізу ієрархій, досить повно і докладно описаних у дослідженнях.

Етап 6. Елементи останніх рівнів ієрархій (ефектів, витрат, можливостей і ризику) плану, які характеризуються значимими відносними вагами, стають контрольними ознаками. Для їх пошуку і виділення

встановлюється поріг значимості ваг. Якщо вага елемента перевищує поріг, то він є контрольною ознакою, в іншому випадку – ні. Це дозволяє видалити з розгляду ті фактори, що незначно впливають на план (рішення). Контрольні ознаки в момент часу  $T_\tau \in T$  мають вигляд:  $e_R^\tau = \{e_{R_j}^\tau | j \in [1; N_R^{contr}]\}$ ,  $e_B^\tau = \{e_{B_j}^\tau | j \in [1; N_B^{contr}]\}$ ,  $e_O^\tau = \{e_{O_j}^\tau | j \in [1; N_O^{contr}]\}$ ,  $e_C^\tau = \{e_{C_j}^\tau | j \in [1; N_C^{contr}]\}$  для ризиків, ефектів, можливостей і витрат відповідно.

Етап 7. Визначаються нечіткі відносні ваги альтернативних варіантів для кожної з контрольних ознак:

– будується адитивна згортка  $N^{contr, \tau} = N_B^{contr, \tau} + N_C^{contr, \tau} + N_O^{contr, \tau} + N_R^{contr, \tau}$  ієрархій, вершинами яких є контрольні ознаки ефектів, витрат, можливостей і ризиків. Останні рівні ієрархій формують альтернативні варіанти плану (рішення) на обґрунтування типу будівництва (модернізації) ПС  $A^\tau = \{A_i^\tau | i \in [1; N_\alpha^\tau]\}$

– експерти дають нечіткі оцінки парних порівнянь елементів ієрархій;

– розраховуються нечіткі відносні ваги альтернатив обґрунтування типу будівництва ПС за контрольними ознаками ризиків планування створення системи:  $w_{R_i}^{alt, \tau} = w_{R_i}^{alt, contr, \tau} | i \in [1, N_\alpha^\tau]$ , де

$$w_{R_i}^{alt, contr, \tau} = w_{R_{ij}}^{alt, contr, \tau} | j \in [1; N_R^{contr, \tau}].$$

Аналогічно  $w_{B_i}^{alt, \tau} = w_{B_i}^{alt, contr, \tau} | i \in [1, N_\alpha^\tau]$ ,

$$w_{C_i}^{alt, \tau} = w_{C_i}^{alt, contr, \tau} | i \in [1, N_\alpha^\tau],$$

$$w_{O_i}^{alt, \tau} = w_{O_i}^{alt, contr, \tau} | i \in [1, N_\alpha^\tau] \text{ – нечіткі відносні}$$

ваги альтернатив по контрольних ознаках ефектів, витрат і можливостей. Для отримання ваг  $w_{B_i}^{alt, contr, \tau}$ ,

$$w_{C_i}^{alt, contr, \tau}, w_{O_i}^{alt, contr, \tau}, w_{R_i}^{alt, contr, \tau} \text{ (локальних ваг),}$$

$$i \in [1, N_\alpha^\tau], j_B \in [1; N_B^{contr, \tau}], j_C \in [1; N_C^{contr, \tau}],$$

$j_O \in [1; N_O^{contr, \tau}]$  обробляється нечітка експертна інформація на базі методу аналізу ієрархій [47].

Етап 8. Визначаються глобальні нечіткі ваги альтернатив обґрунтування типу будівництва (модернізації) повітряного судна:  $w_B^{alt, \tau}$ ,  $w_C^{alt, \tau}$ ,  $w_O^{alt, \tau}$ ,  $w_R^{alt, \tau}$  щодо ефектів, витрат, можливостей і ризиків планування шляхом проведення агрегування (об'єднання), знайдених на етапі 7 нечітких відносних ваг альтернатив по контрольних ознаках ефектів, витрат, ризиків і можливостей. У роботі Т. Саати пропонується використовувати відношення ефектів до витрат як один з методів адитивного синтезу.

Етап 9. Визначаються стратегічні фактори і їх нечіткі відносні ваги. Стратегічні фактори використовуються для оцінки важливості якостей (ефектів, витрат, можливостей і ризиків) у конкретному завданні обґрунтування типу будівництва (модернізації) ПС. Для цього:

– будується ієрархія стратегічних факторів;  
 – експерт дає нечітку оцінку парних порівнянь елементів ієрархії;  
 – обчислюються нечіткі ваги стратегічних факторів шляхом обробки нечіткої експертної інформації на базі методу аналізу ієрархій.

Етап 10. Оцінюється показник інтенсивності якостей (його ступінь виконання щодо фактору) по елементах останнього рівня ієрархії стратегічних факторів.

Етап 11. Проводиться розрахунок глобальних ваг альтернативних варіантів щодо основного плану.

Нехай у результаті обчислень отримано сімейство спільно здійснюваних планів. При виборі плану модернізації ПС оцінюють його якість за критерієм «вартість-ефективність». На основі методу аналізу ієрархій будуються дві ієрархії: для витрат і вигод з одними й тими самими альтернативами на нижньому рівні. Отримавши вектори пріоритетів доходів і витрат, обчислюють відношення доходів до витрат кожної альтернативи. Отримані результати використовують для маржинального аналізу.

Найкращою є альтернатива з найвищим загальним пріоритетом витрат. Це пояснюється тим, що при порівнянні двох чи більше альтернатив не важливі абсолютні значення відповідних вигод і витрат. Представляються найважливішими їх відносні значення, тобто порівнюються прирости вигод з приростами витрат.

Таким чином, удосконалено метод розстановки пріоритетів синтезованих варіантів рішень для обґрунтування типу будівництва (модернізації) повіт-

ряного судна, який, на відміну від відомих, базується на удосконаленому методі аналізу ієрархій, в якому обробляються не тільки точкові, а і нечіткі оцінки експертів, та враховує ризики, можливості, витрати й ефекти, що дозволяє розв'язувати задачі системного багатокритеріального розпізнавання, класифікації та ранжування слабо прогнозованих ситуацій при обґрунтуванні типу будівництва (модернізації) ПС й оцінювати показники кожного альтернативного варіанта рішення.

Отже, запропонований метод має ряд переваг:

– простота вибору експертів, які можуть оперувати при виставлянні оцінок термами природної мови;

– урахування ризиків, можливостей, витрат і ефектів при обґрунтуванні типу будівництва (модернізації) повітряного судна.

### Висновки

В статті удосконалено метод розстановки пріоритетів синтезованих варіантів рішень для обґрунтування типу будівництва (модернізації) повітряного судна, який, на відміну від відомих, базується на удосконаленому методі аналізу ієрархій, в якому обробляються не тільки точкові, а і нечіткі оцінки експертів, та враховує ризики, можливості, витрати й ефекти, що дозволяє розв'язувати задачі системного багатокритеріального розпізнавання, класифікації та ранжування слабо прогнозованих ситуацій при обґрунтуванні типу будівництва (модернізації) ПС й оцінювати показники кожного альтернативного варіанта рішення.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Модернізація літаків Повітряних Сил: курс на повне оновлення авіоніки. – URL: <https://armyinform.com.ua/2020/09/08/modernizacziya-litakiv-povitryanyh-syl-kurs-na-povne-onovlennya-avioniky>.
2. Мерніков Г. І. Модернізація України і досвід Китаю. *Стратегічні пріоритети*. 2011. № 3(20). С. 137-145.
3. Игнатьев С. Экономическая целесообразность внесения изменений в конструкцию транспортного самолета / Игнатьев С., Макушкин С., Спиваковский С. // Бюллетень InCaS. – 2021. – №13 – С. 67-76.
4. Бурковський С. І. Досяжний рівень модернізації літаків МиГ-21 / С. І. Бурковський, С. І. Смик, Д. А. Півнев // Системи озброєння і військова техніка. – 2011. – №1 – С. 8-11.
5. Wu C., X. Y. Zhang, I. C. Yeh, F. Y. Chen, J. Bender, T. N. Wang. Evaluating competitiveness using fuzzy analytic hierarchy process—A case study of Chinese airlines. *Journal of advanced transportation*. 2013. Vol.47. No.7. P. 619-634.
6. Ważny M. The analysis of the military aircraft maintenance system and the modernization proposal. / M. Ważny, K. Wojtowicz // Maintenance and Reliability. – 2008. – Vol.3. – No.39. – pp. 4-11.
7. O'Rourke R. China naval modernization: Implications for US navy capabilities: Background and issues for congress, 2010. 104 p.
8. Bienen H. The military and modernization. 1st Edition, 2009. 256 p.
9. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

Received (Надійшла) 22.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.11.2022

### Development of the method for setting priorities of synthesized options of decisions for justification of the type of aircraft construction (modernization)

V. Serebryannikova

**Abstract.** The work developed a method of prioritization of synthesized options for substantiating the type of construction (modernization) of an aircraft. The developed method is based on the improved method of analysis of hierarchies, in which not only point, but also fuzzy assessments of experts are processed. The use of an improved method of analyzing hierarchies allows taking into account risks, opportunities, costs and the expected effect of choosing one or another type of modernization (construction) of an aircraft. The method makes it possible to solve the problems of systematic multi-criteria recognition, classification and ranking of weakly forecasted situations, which are typical for the creation and operation of modifications of basic aircraft.

**Keywords:** modification, aircraft, transport category, aircraft construction, passenger aircraft, transport aircraft, aviation equipment, modernization.

М. А. Денисенко, А. О. Зуєв, Н. О. Євсіна, В. М. Лещенко

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

## ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ СУШІННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОГНОЗУЮЧОЇ МОДЕЛІ

**Анотація.** Розглянуто процес сушіння капілярно-пористих матеріалів в сушильних камерах періодичної дії. **Метою** статті є оптимізація процесів сушіння капілярно-пористих матеріалів - твердих тіл, що містять велику кількість порожнеч, характерний розмір яких дуже малий у порівнянні з характерним розміром тіла, прикладом таких тіл може бути цегла, бетон та деревина. Було обрано сушильну камеру періодичної дії, яка дозволяє більш якісно та гнучко встановлювати режими сушіння з метою досягнення найбільш оптимальних параметрів, за рахунок помірною об'єму камери періодичної дії дозволяють досягти найменших показників відсоткового вмісту вологи, тим самим матеріал набуває додаткових фізичних властивостей і стає більш стійким до подальшого руйнування. Проведено аналіз існуючих технічних рішень за даною тематикою. Розглянуто вирішення завдань оптимізації із застосуванням прогнозуючої моделі. За **результатами** дослідження отримані графіки перехідних процесів при обмеженому управлінні та швидкості прогріву.

**Ключові слова:** капілярно-пористі матеріали, система управління, прогнозуюча модель, оптимізація, об'єкт управління.

### Вступ

Сьогодні найчастіше саме в сушильних камерах відбувається сушіння капілярно-пористих матеріалів. Сушіння відбувається відповідно до відомих всіх законів фізики. Чим швидше до матеріалу надходить енергія, необхідна випаровування рідини, тим швидше він сохне [1]. Існує кілька видів сушильних камер, але в даній роботі розглядається сушильна камера періодичної дії. Ці камери значно коротші за інші та під час сушіння у всій камері підтримуються постійні параметри середовища. У такій камері матеріал можна сушити до будь-яких необхідних кінцевих вологостей [2]. На даний момент обладнання сушильних камер оснащено автоматичними системами контролю вологості, управління вентиляцією тощо. Такі сушильні камери витрачають на 20% менше енергії.

**Огляд існуючих технічних рішень.** Одними з перших регуляторів були ПІ- та ПІД-контролери. Вони довели свою ефективність в управлінні різноманітними процесами. Використання таких контролерів не вимагає знання точної моделі процесу, тому вони ефективні в управлінні промисловими процесами, математичні моделі яких досить складні. ПІ- та ПІД-контролери будуються на основі класичної теорії управління та прості для розуміння. Встановлення зв'язків між параметрами та управління діями системи можуть здійснюватися інженерами-практиками та операторами. Крім того, за останні десятиліття розроблено кілька методів налаштування ПІ- та ПІД-контролерів. Зіглер і Нікольс запропонували метод налаштування, заснований на даних про реакцію на одиничний ступінчастий вплив. Він широко використовувався протягом багатьох років і виявився досить ефективним. На його основі Такахаші та інші запропонували метод налаштування для ПІ- та ПІД-контролерів з дискретним часом. Більш сучас-

ний спосіб автоматичного налаштування ПІ- та ПІД-контролерів був запропонований Нішикавой в [3]. Він вимагає подачі вхідного випробувального сигналу для оцінки параметрів процесу. Оптимальні значення ПІ- та ПІД-параметрів досягаються шляхом мінімізації зваженого інтеграла квадратичної помилки. Однак, поряд з вищезазначеними перевагами, ПІ- та ПІД-контролери мають і ряд недоліків. Так, якщо робоча точка процесу змінюється, параметри контролера потрібно перенастроювати вручну, щоб отримати нове оптимальне налаштування. Налаштування має виконуватися досвідченим оператором. Для систем із взаємодіючими контурами ця процедура може бути складною та займати багато часу.

Одним із сучасних підходів до аналізу та синтезу систем управління, що базуються на математичних методах оптимізації, є теорія управління динамічними об'єктами з використанням прогнозуючих моделей – Model Predictive Control (MPC). В [4] дуже гарно описується алгоритм цього метода, але погано показана реалізація метода саме на конкретних прикладах, в тому числі в системах управління.

**Метою статті** є оптимізація процесу пропарювання при сушінні капілярно-пористих матеріалів з використанням прогнозуючих моделей. При цьому розглянуто вирішення цього завдання шляхом вибору різних критеріїв оптимальності та можливості їхньої технічної реалізації.

### Метод прогнозуючих моделей – Model Predictive Control (MPC)

Цей підхід почав розвиватися на початку 60-х років для управління процесами та обладнанням у нафтохімічному та енергетичному виробництві, для яких застосування традиційних методів синтезу було вкрай утруднене у зв'язку з винятковою складністю їх математичних моделей. Ідея оптимізації прогнозованого програмного руху, що є основою MPC-

методів, виникла в рамках двох незалежних, однак близьких по суті підходів. Перший з них, що називається Dynamics Matrix Control (DMC), розвивався зусиллями фахівців компанії Shell Oil у середині 60-х років, а другий – Model Algorithmic Control (MAC) – був розроблений французькими інженерами хімічної промисловості в кінці 60-х. На основі останнього підходу вперше було створено комерційний пакет програм IDCOS (Identification and Command), який певною мірою послужив прообразом сучасної програмної підтримки методів керування з прогнозом. Нині MPC-метод перебуває у стадії інтенсивного розвитку, що свідчить велика бібліографія опублікованих останні роки наукових праць, присвячених даній проблематиці, зокрема в [5] дуже якісно побудована модель управління з прогнозуванням, показана стабільна робота такого об'єкта, але треба багато кроків для оптимізації процесу, що може бути недоліком. Сфера практичного застосування суттєво розширилася та охоплює технологічні процеси в хімічній [6] та будівельній індустрії, легкій та харчовій промисловості [7], в аерокосмічних дослідженнях, у сучасних системах енергетики тощо. Розвиток ідей управління з прогнозуванням відбувається у напрямі використання нелінійних моделей, забезпечення стійкості за Ляпуновим контрольованих рухів, надання робастних властивостей замкнутій системі управління, застосування сучасних оптимізаційних методів у реальному масштабі часу. Основною перевагою MPC-методу, що визначає його успішне використання в практиці побудови та експлуатації систем управління, є відносна простота базової схеми формування зворотного зв'язку, що поєднується з високими адаптивними властивостями. Остання обставина дозволяє керувати багатови-

мірними та багатозв'язаними об'єктами зі складною структурою, що включає нелінійності, оптимізувати процеси в режимі реального часу в рамках обмежень на керуючі та керовані змінні, враховувати невизначеність у завданні об'єктів та обурень. Крім того, можливий облік транспортного запізнення, облік змін критеріїв якості під час процесу та відмов датчиків системи вимірювання. Принцип MPC-методу становить таку схему управління динамічними об'єктами за принципом зворотний [4]:

1. Розглядається деяка (щодо проста) математична модель об'єкта, початковими умовами для якої є його поточний стан. При заданому програмному управлінні виконується інтегрування рівнянь цієї моделі, що дає прогноз руху об'єкта на певному кінцевому відрізку часу (горизонт прогнозу).

2. Виконується оптимізація програмного управління, метою якого є наближення регульованих змінних прогнозуючої моделі до відповідних сигналів на горизонті прогнозу. Оптимізація здійснюється з урахуванням всього комплексу обмежень, накладених на управляючі та регульовані змінні.

3. На кроці обчислень, що становить фіксацію малу частину горизонту прогнозу, реалізується знайдене оптимальне управління та здійснюється вимірювання (або відновлення за вимірюваними змінними) фактичного стану об'єкта на кінець кроку.

4. Горизонт прогнозу зсувається на крок уперед і повторюються пункти 1 - 3 даної послідовності дій.

5. Описана схема та принцип цього методу показано на рис. 1.

Об'єкт керування — сушильна камера періодичної дії, структурна схема якої зображена на рис. 2 [7].

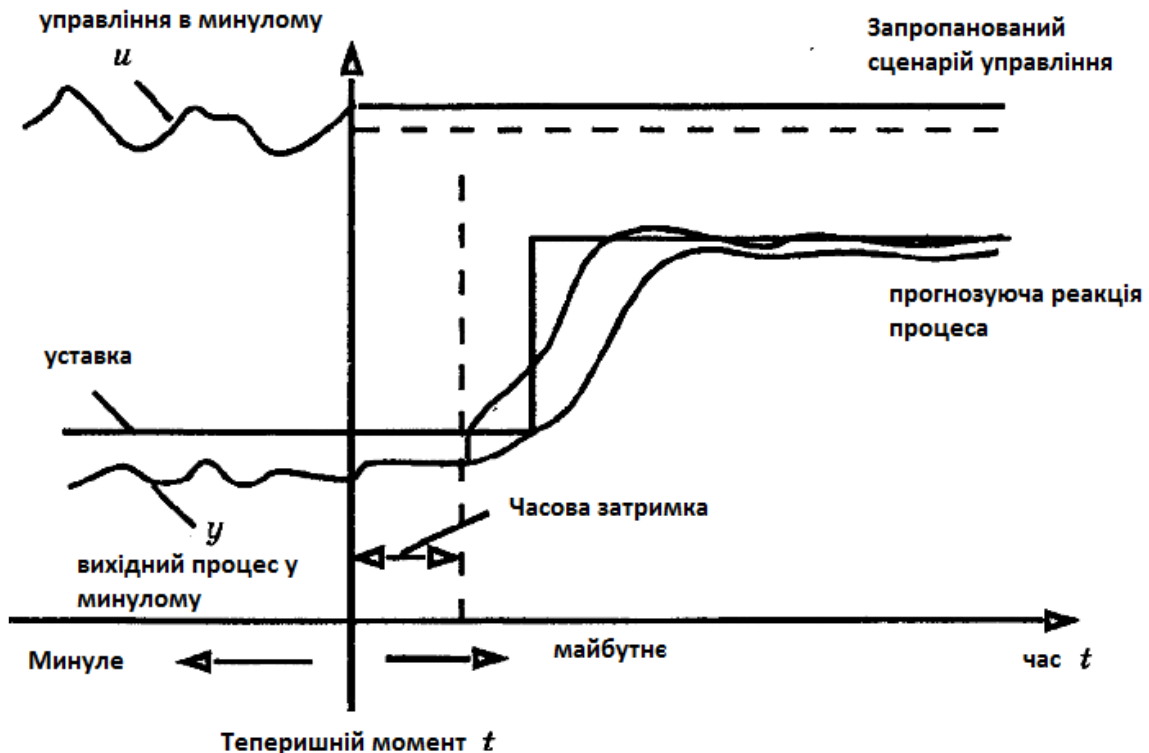


Рис. 1. Схема керування на основі прогнозування

Передавальній функція об'єкта управління може бути записана у такому вигляді [8]:

$$K(s) = \theta(s)/U_1(s) = \frac{K_c (T_2s+1)(T_4s+1)}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)(T_4s+1)(T_{21}s+1)} \quad (1)$$

Згідно з наведеним методом MPC візьмемо за поточну (просту модель) передавальну функцію, що характеризує аперіодичну ланку другого порядку, в знаменнику якої буде добуток двох перших дужок з (1). Горизонт прогнозу візьмемо невеличкий інтервал часу, наприклад [0,0.5] та зробимо моделювання в системі Simulink для процесу з наступними параметрами [8]:

$$k_1 = 130, k_2 = 0.61, k_3 = 1, k_4 = 40, k_5 = 2, k_{mc} = 0.61, k_{cm} = 0.61, T_1 = 1.12, T_2 = 1.17, T_3 = 2.33,$$

$$T_4 = 0.33, T_5 = 0.83, T_6 = 1.84, T_{21} = 1.271.$$

На основі даної математичної моделі та із застосуванням зазначеного метода отримаємо наступні графіки зміни температури та вологості (рис. 3, 4):

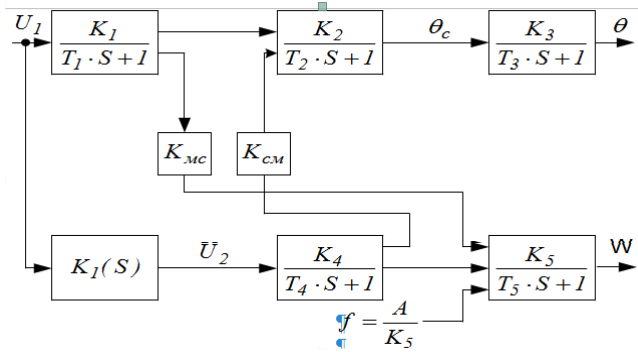


Рис. 2. Структурна схема об'єкта управління

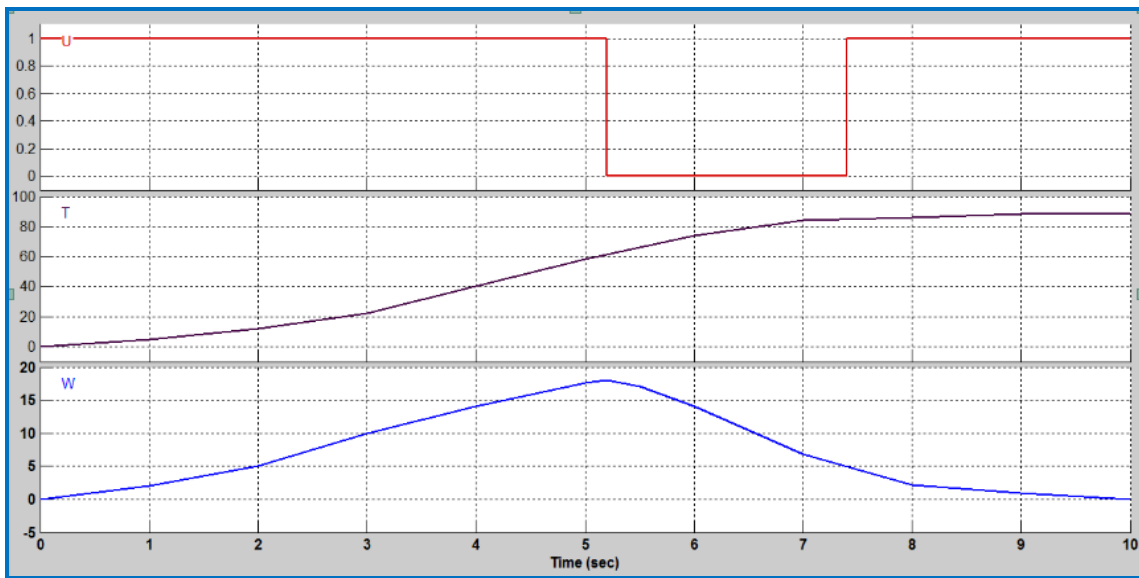


Рис. 3. Перехідні процеси при обмеженому управлінні

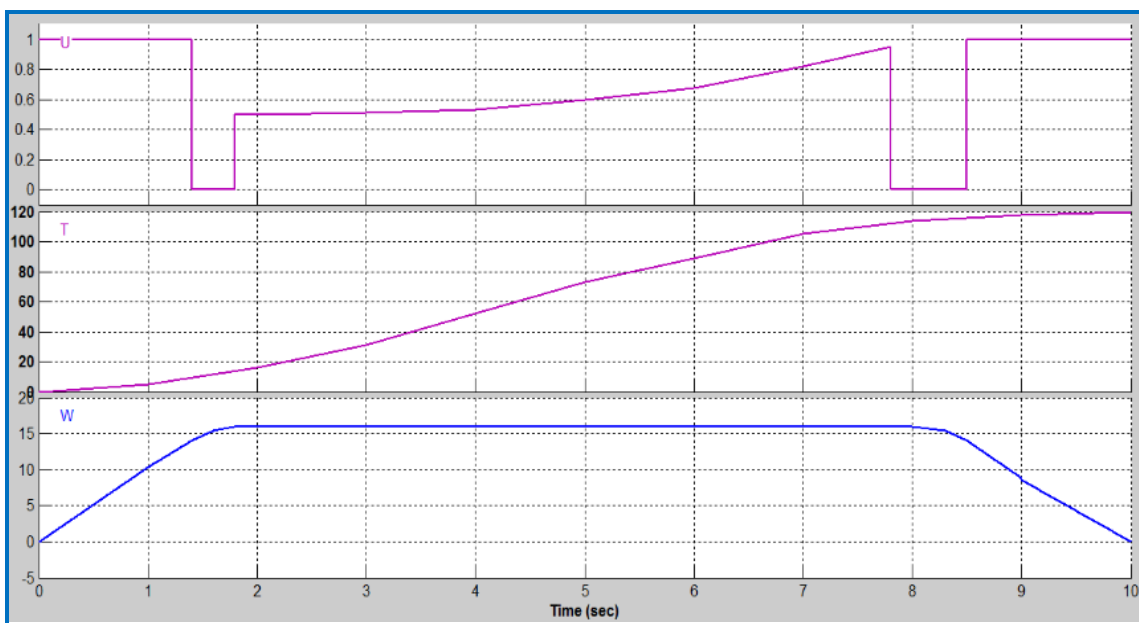


Рис. 4. Перехідні процеси при обмеженому управлінні та швидкості прогріву

Наведені графіки перехідного процесу дуже близькі до отриманих іншим методом в [9], але в цьому випадку температура змінюється більш плавно, хоча регулюється не так швидко, як в [10], змі-

нюючи інтервал часу зі зменшеним кроком можливо досягти ще більшої швидкодії (табл. 1). Це цілком доводить правильність вибору математичної моделі та прогнозування.

Таблиця 1 – Порівняння швидкодії при різних обмеженнях

Горизонт прогнозу	Швидкодія при обмеженому управлінні, с.	Швидкодія при обмеженому управлінні та швидкості прогріву, с.
[0,0,5]	5	5,2
[0,0,4]	4,97	5,1
[0,0,3]	4,92	5,05
[0,0,2]	4,84	5
[0,0,1]	4,71	4,98

### Висновки

1. Визначення сушильної камери та обрання правильного методу управління є найбільш ефективним та практичним інструментом на сьогоднішній день.

2. Проведений аналіз методів оптимізації процесу управління та розглянутий метод управління за допомогою прогнозуючих моделей, який найбільш

повно порівняно з ПІ- та ПІД-управлінням дозволяє оптимізувати процеси, у тому числі, в режимі реального часу в рамках обмежень на змінні, що управляються.

3. Отримані графіки перехідних процесів при обмеженому управлінні та швидкості прогріву, які цілком доводять успішність застосування цього методу на практиці.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Sokolovskyy, I., Ozarkiv, I., & Kobrynovych, M. (2015). Теоретичні дослідження кінетики та динаміки процесу сушіння капілярно-пористих колоїдних матеріалів. //Науковий вісник НЛТУ України, 2015. -25(9), 351-355. <https://doi.org/10.15421/40250954>.
- Личагин Б.І., Личагин І.М. Сушильна камера періодичної дії з подвійними поздовжніми стінами для висушування пиломатеріалів //Науковий вісник НЛТУ України. - 2008. №18.3, с. 146-148.
- Nishikawa, Y. N Sanomiya, T. Ohta, and H. Tanaka, «A method for auto-tuning of PID control parameters», Automatica, Vol. 20, pp. 321-332, 1984.
- Bemporad A., Borrelli F., Morari M. Model predictive control based on linear programming – The explicit solution // IEEE transactions on automatic control. 2002. Vol. 47. No 12. P. 1974–1985.
- Mayne D.Q., Rawlings J.B., Rao C.V., Sokaert. Constrained model predictive control: Stability and optimality //Automatica. – 2000. – Vol. 36. – P. 789-814..
- Diez E., Meyer K., Buck A., Tsotsas E., Heinrich S. Influence of process conditions on the product properties in a continuous fluidized bed spray granulation process // Chemical engineering research and design. – 2018. – Vol. 139. – P. 104-115. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.09.032>.
- Gao X., Wang J., Wang S., Li Z. Modeling of drying kinetics of green peas by reaction engineering approach / X. Gao [et al.] // Drying Technology. – 2016. – Vol. 34, No 4. – P. 437-442. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1060491>.
- Anatoly Garon, Mykola Denysenko, Andrey Zuev, Natalia Yevsina // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2022. – Т. 3 (69). – С. 18-21. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.3.018>.
- Качанов П.А., Рогачёв А.И., Супрунова С.П. Оптимальное управление процессом сушки при ограничении скорости нагрева // Вестник Харьковского политехнического института. – Харьков: ХГУ, 1984. – Вып.10. - №210. – С.16-18.
- Рогачёв А.И., Денисенко Н.А. Энергосберегающее управление процессом пропарки при сушке капиллярно-пористых материалов //Вісник НТУ «ХПІ», збірник наукових праць. Тематич. випуск Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХПІ». 2007. - №36. - с.9-15.

Received (Надійшла) 22.08.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.10.2022

### Optimization system of drying using a prediction model

Denysenko Mykola, Zuev Andrey, Yevsina Natalia, Leshchenko Viacheslav

**Abstract.** The process of drying capillary-porous materials in drying chambers is considered. The research **purpose** is to optimize the drying of capillary-porous materials - solids with a large number of voids, which are very small in size compared to the typical size of the body, examples of such bodies are brick, concrete and wood. There was a drying chamber of the selected action, which allows you to more efficiently and flexibly set the optimal drying parameters to achieve the best parameters, due to the moderate volume of the chamber. more resistant to further destruction. The analysis of existing technical solutions on this topic is carried out. The problem of optimization with the use of predictive models is considered. According to the **results** of the study of the obtained graphs of transients with limited control and heating rate.

**Keywords:** capillary-porous materials, control system, predictive model, optimization, control object.

Н. О. Євсіна, А. О. Зуєв, А. І. Гапон, М. А. Денисенко, М. В. Тарасенко

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

## СИНТЕЗ АДАПТИВНОГО НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ У КАМЕРНІЙ СУШАРЦІ

**Анотація.** Метою статті є синтезування нечіткого логічного регулятора температури сушіння капілярно - пористих матеріалів, що дозволяє використовувати стандартну форму опису лінгвістичних змінних і мінімальний набір керуючих правил. Визначено, що простота ПД-регулятора, яка виражена через усього три параметри налаштування і зрозумілість фізичного змісту кожного з них, разом з тим зумовлює зменшення кола задач, де він може бути використаний ефективно. Для складних теплових об'єктів керування необхідно застосовувати більш досконалу структуру регулятора. Запропоновано використовувати нечітке управління при недостатньому знанні щодо об'єкта управління, але наявності досвіду управління ним. На нечіткій регулятор покладається завдання вироблення впливу, що управляє, в діапазоні зміни динамічної помилки регулювання і її похідної щодо її порогових значень. У результаті синтезованого нечіткого логічного регулятора надає системі автоматичного регулювання здатність підтримувати на заданому рівні температуру сушарки за наявності зовнішніх збурень, а також якісно керувати технологічним процесом сушіння капілярно-пористих матеріалів при широкому діапазоні зміни його параметрів у часі.

**Ключові слова:** капілярно-пористі матеріали, нечітке управління, адаптивний нечіткий логічний регулятор, математична модель, функція приналежності, дефазифікація.

### Вступ

Сучасні сушильні комплекси являють собою складні системи, що функціонують в умовах великої невизначеності, не повноти знань і нечіткості описів як самої системи, так збурень, що діють на неї. Для управління такими об'єктами недостатньо застосування класичних методів теорії управління і виникає необхідність розробки нових методів і підходів із залученням досягнень сучасних інформаційних технологій. Один із таких підходів [1], що базується на теорії нечітких множин та нечіткої логіки, є основою створення системи управління технологічними об'єктами, що функціонують в умовах невизначеності інформації.

В цьому випадку для підвищення ефективності управління технологічними об'єктами із застосуванням сучасних методів управління необхідно вирішити такі завдання:

- оцінка показників якості невизначеності [2];
- зниження (або компенсація) апріорної невизначеності знань про процес за рахунок використання оперативної інформації від засобів вимірювання та побудови контуру адаптації [3];
- формування такого закону управління, який би гарантував стійкість та задані показники точності та якості системи керування (СК) в умовах некомпенсованої невизначеності [4].

Одним із можливих шляхів вирішення зазначених завдань є використання методів адаптивного, робастного і нечіткого управління одночасно [5].

**Огляд існуючих технічних рішень.** Важливим моментом при синтезі нечіткого регулятора є побудова математичної моделі для подання знань про динамічні об'єкти в умовах нечіткої інформації, яка повинна дозволити визначити показники невизначеності, давати опис випадкових процесів, інваріантно до їх закону розподілу.

Лінійні закони керування, зокрема ПД-закон, мають погані показники якості при управлінні нелі-

нійними і складними системами, а також при недостатній інформації про об'єкт управління. Характеристики регуляторів в цих випадках можна поліпшити за допомогою методів нечіткої логіки [6, 7]. Нечітке управління використовується при недостатньому знанні об'єкта управління, але наявності досвіду управління ним; в нелінійних системах, ідентифікація яких занадто трудомістка; а також у випадках, коли за умовами задачі необхідно використовувати знання експерта. Прикладом може бути доменна піч, колона ректифікації, прямоточний котел, математична модель яких містить багато емпіричних коефіцієнтів, що змінюються в широкому діапазоні і викликають великі труднощі при ідентифікації. У той же час кваліфікований оператор досить добре управляє такими об'єктами, користуючись показаннями приладів і накопиченим досвідом. Знання, на які спирається оператор, реалізуються у формі правил "ЯКЩО-ТО", що мають нечіткий інформаційний зміст [8].

При застосуванні нечіткої логіки в системах управління технологічними процесами можна видокремити лише два принципових підходи до побудови структурних схем систем керування: для побудови самого регулятора і для організації підлаштування коефіцієнтів ПД-регулятора.

**Метою статті** є синтезування нечіткого логічного регулятора температури сушіння капілярно - пористих матеріалів, що дозволяє використовувати стандартну форму опису лінгвістичних змінних і мінімальний набір керуючих правил.

### Постановка завдання керування

У загальному випадку математична модель динамічного об'єкта може бути подана у вигляді:

- нечітке рівняння стану

$$\bar{d}x/dt = \bar{A} \otimes \bar{x} \oplus \bar{B} \otimes u, \mu_s (s), \quad (1)$$

- нечіткі управління спостереження

$$\bar{y} = \bar{C} \otimes \bar{x}, \quad (2)$$

- нечіткі початкові умови



$$\bar{x}_1(0) = \bar{D}_1 \quad \bar{x}_2(0) = \bar{D}_2, \dots, \bar{x}_n(0) = \bar{D}_n, \quad (3)$$

де  $\otimes, \oplus$  - нечіткі операції відповідно додавання і множення;  $u$  - керуючий сигнал (скаляр), що приймає нечіткі значення;  $\bar{x} = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_i, \dots, \bar{x}_n\}$  - вектор нечіткого стану,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $\zeta = 1, 2, \dots, 1$ ;  $\mu_{\bar{s}}(s)$  - показник нечіткого числа змінних стану і представляє вагу  $s$ -го рівняння стану;  $\bar{y} = \{\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_{\zeta}, \dots, \bar{y}_l\}$  вектор нечітких вихідних змінних;

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} \bar{A}_1^1 & \dots & \bar{A}_1^n \\ \dots & \dots & \dots \\ \bar{A}_n^1 & \dots & \bar{A}_n^n \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} \bar{B}^1 \\ \dots \\ \bar{B}^n \end{bmatrix}, \bar{C} = \begin{bmatrix} \bar{C}_1^1 & \dots & \bar{C}_1^n \\ \dots & \dots & \dots \\ \bar{C}_l^1 & \dots & \bar{C}_l^n \end{bmatrix}$$

матриці нечітких коефіцієнтів моделі.

Деяка  $i$ -та змінна вектору стану як функція часу  $t$  може бути представлена нечітким ставленням (АЛЕ)  $\bar{x}_i(t) = \{t, x_i/\mu_{\bar{x}_i}(t, x_i)\}$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , у фіксований момент часу зазначена змінна може бути виражена нечіткою множиною (НМ):  $\bar{x}_i = \{x_i/\mu_{\bar{x}_i}(x_i)\}$ .

Аналогічний опис має  $\zeta$ -а вихідна змінна:

$$\bar{y}_{\zeta}(t) = \{t, y_{\zeta}/\mu_{\bar{y}_{\zeta}}(t, y_{\zeta})\} \quad \zeta = 1, 2, \dots, 1,$$

$$\mu_{\bar{x}_i}(x_i) = \varphi(x, a_{\bar{x}_i}, b_{1\bar{x}_i}, b_{2\bar{x}_i}, v_{1\bar{x}_i}, v_{2\bar{x}_i}) =$$

$$\left( \begin{aligned} & \left( b_{1\bar{x}_i}(a_{\bar{x}_i} - x) \right)^{v_{1\bar{x}_i}} \frac{\text{sign}(v_{1\bar{x}_i}(a_{\bar{x}_i} - x)) + 1}{2} + \\ & + \left( b_{2\bar{x}_i}(a_{\bar{x}_i} - x) \right)^{v_{2\bar{x}_i}} \frac{\text{sign}(v_{2\bar{x}_i}(a_{\bar{x}_i} - x)) + 1}{2} + 1 \end{aligned} \right)^{-1} \quad (4)$$

В формулі (4) коефіцієнт  $a_{\bar{x}_i}$  представляє моду ФП, коефіцієнти  $b_{1\bar{x}_i}$  та  $b_{2\bar{x}_i}$  задають ширину ФП,  $v_{1\bar{x}_i}$  і  $v_{2\bar{x}_i}$  - нахил ФП до осі  $x_i$ , тобто контрастність. Коефіцієнти  $b_{1\bar{x}_i}$ ,  $b_{2\bar{x}_i}$ ,  $v_{1\bar{x}_i}$ ,  $v_{2\bar{x}_i}$  утворювати будь-яку форму ФП і можуть виступати як показники невизначеності.

Задано показники якості СК (час перехідного процесу, перерегулювання, помилка стеження тощо) у формі функцій корисності:

$$\bar{Q}_k^3 = \{Q_k^3/\mu_{\bar{Q}_k^3}(Q_k^3)\}, k = 1, 2, \dots, K,$$

$$\mu_{\bar{Q}_k^3}(Q_k^3) = \varphi(Q_k^3, a_{\bar{Q}_k^3}, b_{1\bar{Q}_k^3}, b_{2\bar{Q}_k^3}, v_{1\bar{Q}_k^3}, v_{2\bar{Q}_k^3}), \quad (5)$$

де  $K$  - число показників якості системи керування.

Визначено еталонну модель на основі заданих показників якості управління:

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m u_m,$$

де  $u_m$  - вплив системи, що задає;  $x_m(t)$  - вектор еталонного стану.

Задано обмеження на змінні вектора стану та обмеження на керування:

$$g_1(\bar{x}, u, \gamma, t) < x_{1max}, \quad g_2(\bar{x}, u, \gamma, t) < x_{2min}, \dots,$$

$$g_{2n-1}(\bar{x}, u, \gamma, t) < x_{nmax},$$

$$g_{2n}(\bar{x}, u, \gamma, t) < x_{nmin}, \dots \quad (6)$$

$$g_{m-1}(\bar{x}, u, \gamma, t) < u_{max}, \quad g_m(\bar{x}, u, \gamma, t) < u_{min}.$$

$$\bar{y}_{\zeta} = \{y_{\zeta}/\mu_{\bar{y}_{\zeta}}(y_{\zeta})\},$$

де  $\mu_{\bar{x}_i}, \mu_{\bar{y}_{\zeta}}$  - функції приналежності (ФП);  $x_i, y_{\zeta}$  - значення із універсальних множин.

Елементи матриць  $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$  задані НМ:

$$\bar{A}_1^1 = \{A_1^1/\mu_{\bar{A}_1^1}(A_1^1)\}, \dots, \bar{A}_n^n = \{A_n^n/\mu_{\bar{A}_n^n}(A_n^n)\},$$

$$\bar{B}^1 = \{B^1/\mu_{\bar{B}^1}(B^1)\}, \dots, \bar{B}^n = \{B^n/\mu_{\bar{B}^n}(B^n)\},$$

$$\bar{C}_1^1 = \{C_1^1/\mu_{\bar{C}_1^1}(C_1^1)\}, \dots, \bar{C}_l^n = \{C_l^n/\mu_{\bar{C}_l^n}(C_l^n)\}.$$

Початкові умови описані НМ  $\bar{D}_i = \{x_i/\mu_{\bar{D}_i}(x_i)\}$ , а число змінних вектора стану - НМ  $\bar{S} = \{s/\mu_{\bar{S}}(s)\}$ , де  $s=1, 2, \dots, n$  - порядковий номер змінної вектора стану. Функції приналежності задані аналітичною залежністю, наприклад, для змінної  $x_i$ .

Нехай як мету управління обрана мінімізація середнього відхилення змінних вектора стану реальної поведінки ОУ від зразка.

Необхідно синтезувати СК і здійснити налаштування регулятора таким чином, щоб всі сигнали в СК були обмежені, тобто  $|x(t)| < x_{доп}, |u(t)| < u_{доп}$ , а перехідні процеси в системі задовольняли заданим показникам якості

### Алгоритм синтезу адаптивного нечіткого логічного регулятора (НЛР)

У даній роботі на нечіткий регулятор покладається завдання вироблення впливу, що управляє, в діапазоні зміни динамічної помилки регулювання і її похідної щодо її порогових значень.

Вхідний вектор НЛР перетворюється на нечітку форму  $E^* = (e_1^*, e_2^*)$  за допомогою блоку фазифікації, потім виконується нечіткий логічний висновок у базі правил, у результаті виходить нечітка вихідна змінна  $u^*$ . Переведення значень вектора управління  $u^*$  з нечіткої області чітку  $u$  здійснюється блоком дефазифікації [7].

Передобробка вхідного сигналу помилки регулювання та її похідної здійснюється за формулою

$$e_i^N = \begin{cases} e_i, & |e_i| < e_i^{max}; \\ e_i^{max} \text{sign}(e_i), & |e_i| \geq e_i^{max}. \end{cases} \quad (7)$$

Постобробка вхідного керуючого сигналу  $u$  здійснюється вирішенням задачі денормалізації  $u$

$$u = u_N DN = u_N |u_{max}|, \quad (8)$$

де  $max u$  - максимальне значення управління, що подається об'єкту.

Як правило, база знань НЛР містить опис термів лінгвістичних змінних (ЛЗ), які мають бути визначені заздалегідь для кожної вхідної та вихідної змінної.

Для цього введемо такі лінгвістичні змінні:

$$e_1 = (\text{"Помилка керування"}, T_{e1}, E_1),$$

$$e_2 = (\text{"Похідна помилки"}, T_{e2}, E_1),$$

$$u = (\text{"Керування"}, T_u, U),$$

де  $T_{e_i} = \{T_{e_i}^1, T_{e_i}^2, \dots, T_{e_i}^k\}, i = \overline{1, k}$ ,

$T_u = \{T_u^1, T_u^2, \dots, T_u^k\}$ , - терм-множини значень лінгвістичних змінних  $e_1, e_2$  відповідними функціями приналежності (ФП)

$$T_{e_i}^l = \mu_{e_i}^l(e_i), T_u^l = \mu_u(u), l = \overline{1, k} \quad (9)$$

заданими відповідно на універсальних множинах

$$E_i = [E_{i min}, E_{i max}] \text{ и } U = [U_{min}, U_{max}]. \quad (10)$$

Припустимо, що кожен вхідний та вихідний лінгвістичної змінної  $T_x = \{T_e, T_{e/dt}, T_u\}$  відповідають

7 термів:  $T_x = \{ 'NB', 'NM', 'NS', 'ZE', 'PS', 'PM', 'PB' \}$  з трикутними функціями приналежності:

$$\mu_{T_x}(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } x \leq a, \\ (x - a)/(b - a), & a \leq x \leq b, \\ (c - x)/(c - b), & b \leq x \leq c, \\ 0, & \text{якщо } c \leq x. \end{cases} \quad (11)$$

Тоді результатом фазифікації є лінгвістичні змінні:

$$\begin{aligned} e_1, &= \ll \text{Помилка} \gg = \\ &\left[ \mu_{NB_e}(e)/NB_e, \mu_{NM_e}(e)/NM_e, \mu_{NS_e}(e)/NS_e, \mu_{ZE_e}(e)/ZE_e, \mu_{PS_e}(e)/PS_e, \mu_{PM_e}(e)/PM_e, \mu_{PB_e}(e)/PB_e \right]; \\ e_1, &= \ll \text{Швидкість змінення помилки} \gg = \\ &= \left[ \mu_{NB_{e/dt}}(e/dt)/NB_{e/dt}, \mu_{NM_{e/dt}}(e/dt)/NM_{e/dt}, \mu_{NS_{e/dt}}(e/dt)/NS_{e/dt}, \mu_{ZE_{e/dt}}(e/dt)/ZE_{e/dt}, \mu_{PS_{e/dt}}(e/dt)/PS_{e/dt}, \mu_{PM_{e/dt}}(e/dt)/PM_{e/dt}, \mu_{PB_{e/dt}}(e/dt)/PB_{e/dt} \right]; \\ u^* &= \ll \text{Керування} \gg = \\ &= \left[ \mu_{NB_u}(u)/NB_u, \mu_{NM_u}(u)/NM_u, \mu_{NS_u}(u)/NS_u, \mu_{ZE_u}(u)/ZE_u, \mu_{PS_u}(u)/PS_u, \mu_{PM_u}(u)/PM_u, \mu_{PB_u}(u)/PB_u \right]. \end{aligned}$$

Далі формується база правил логічного виводу у вигляді

$$\text{ЯКЩО } (T_{e1}^j \times T_{e2}^j), \text{ ТО } T_u^j, j = \overline{1,7},$$

де  $T_{e1}^j \times T_{e2}^j$  - декартовий додатак нечітких множин  $E_1$  і  $E_2$ , заданих на шкалах  $E_1$  і  $E_2$  з функцією приналежності

$$\mu_{(T_{e1}^j \times T_{e2}^j)}(e_1, e_2) = \mu_{T_{e1}^j}(e_1) \wedge \mu_{T_{e2}^j}(e_2), \quad (12)$$

то  $T_u^j$  - відповідна вихідна нечітка множина, яке визначається нечітким відношенням

$$R^j = (T_{e1}^j \times T_{e2}^j) \times T_u^j, j = \overline{1,7} \quad (13)$$

з функцією приналежності

$$\mu_{R^j}((e_1, e_2), u^*) = \left( \mu_{T_{e1}^j}(e_1) \wedge \mu_{T_{e2}^j}(e_2) \right) \wedge \mu_{T_u^j}(u^*). \quad (14)$$

Сукупність усіх правил, відповідних нечіткому відношенню  $R = \bigcup_{j=1}^7 R^j$  з функцією приналежності

$$\mu_R((e_1, e_2), u^*) = \bigvee_{j=1}^7 \left[ \mu_{T_{e1}^j}(e_1) \wedge \mu_{T_{e2}^j}(e_2) \wedge \mu_{T_u^j}(u^*) \right], \quad (15)$$

визначає базу знань нечіткого регулятора і задає закон функціонування нечіткої системи.

Таким чином, при заданих значеннях вхідних лінгвістичних змінних  $T_{e1}^j$  і  $T_{e2}^j$  вихідне значення нечіткого регулятора визначається на основі наступного композиційного правила  $B^j = (T_{e1}^j \times T_{e2}^j) \bullet R$  зі ступенем приналежності

$$\mu_{T_u^j}(u^*) = \bigvee_{e_1 \in E_1, e_2 \in E_2} \left[ \mu_{(T_{e1}^j \times T_{e2}^j)}(e_1, e_2) \wedge \mu_R(e_1, e_2, u^*) \right]. \quad (16)$$

У випадку, коли лінгвістичним змінним вхідних сигналів  $e_1, e_2$  відповідають нечіткі множини  $T_{e1}^j$  і  $T_{e2}^j$  нечітка множина лінгвістичної змінної сигналу керування  $u^*$  визначається наступним чином

$$\mu_{T_u^j}(u^*) = \max_{e_1, e_2} \left\{ \min_{j=1}^m \left[ \prod_{i=1}^n \mu_{T_{e_i}^j}(e_i) \right] \cdot \mu_{T_u^j}(u^*) \right\}. \quad (17)$$

Для отримання реального значення вихідного сигналу нечіткого регулятора здійснюється процес дефазифікації

$$u = \sum_{n=1}^9 u_n^* \mu_{T_u}(u_n^*) / \sum_{n=1}^9 \mu_{T_u}(u_n^*). \quad (18)$$

Функцію приналежності нечіткого значення представляють у вигляді

$$\mu_{T_u^j}(u) = \begin{cases} \prod_{i=1}^n \mu_{T_{e_i}^j}(e_i), & u = \lambda^j, \\ 0, & u \neq \lambda^j, \end{cases} \quad (19)$$

де  $\lambda^j$  - дискретні чисельні значення вихідного сигналу.

Тоді визначальне значення вихідного сигналу нечіткого регулятора на етапі дефазифікації обчислюється як

$$u = \sum_{j=1}^m \lambda^j \left[ \prod_{i=1}^n \mu_{T_{e_i}^j}(e_i) \right] / \sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{T_{e_i}^j}(e_i), \quad (20)$$

$$\text{або } u(\bar{e}, \bar{\lambda}) = \sum_{j=1}^m \lambda^j \zeta_j(\bar{e}), \quad (21)$$

$$\text{де } \zeta_j(\bar{e}) = \prod_{i=1}^n \mu_{T_{e_i}^j}(e_i) / \sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{T_{e_i}^j}(e_i). \quad (22)$$

Таким чином, у разі повноти і несуперечливості бази правил нечіткого логічного висновку, закон функціонування нечіткого регулятора визначається видом і розподілом по діапазону регулювання функцій приналежності і вибраним алгоритмом нечіткого виводу.

Запропонований алгоритм синтезу нечіткого логічного регулятора дозволяє використовувати стандартну форму опису лінгвістичних змінних і мінімальний набір управляючих правил.

База правил нечіткого регулятора надана в табл. 1, у якій позначення: N - негативне, Z - нульове, P - позитивне, NB - велике негативне, NM - середнє негативне, ZE - близьке до нульового, PM - середнє позитивне, PB - велике позитивне. Поверхня відгуку нечіткого регулятора, що отримано, представлена на рис. 1.

Таблиця 1 - База правил нечітко-логічного регулятора

$\begin{matrix} e_2 \\ e_1 \end{matrix}$	NB	NS	NM	Z	PM	PS	PB
NB	NB	NB	NB	PS	Z	PM	PS
NS	NS	NS	NS	NM	PM	PM	PS
NM	NS	NM	NM	Z	Z	PM	PS
Z	NS	NM	NM	Z	PM	PM	PS
PM	NM	NM	Z	Z	PM	PM	PS
PS	NM	NM	Z	PM	PS	PS	PS
PB	NS	NM	Z	PS	PS	PB	PB

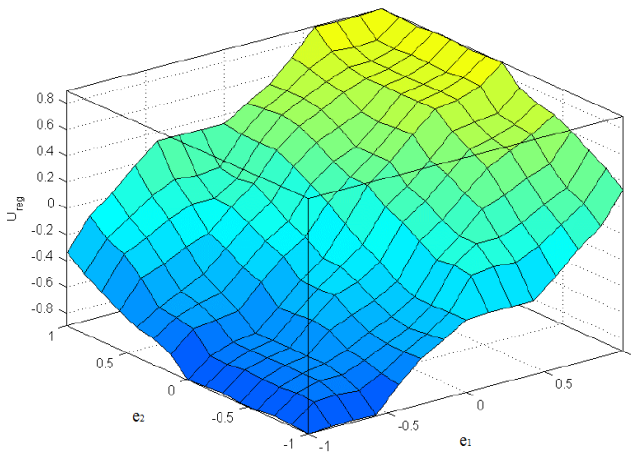


Рис. 1. Поверхня відгуку нечіткого регулятора

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

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

або швидкість

$$\Delta e(k) = \Delta e(k) / \Delta t$$

та один вихід  $u(k)$  – управління в моменти часу  $k\Delta t$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$ , де  $\Delta t$  – шаг дискретизації.

### Висновки

Проведено дослідження ефективності запропонованого підходу при роботі нечіткої адаптивної системи для управління температурою у камерній сушарці періодичної дії щодо сушіння капілярно-пористих матеріалів.

Отримані такі результати:

1) оперативне формування керуючих сигналів сприяє скороченню часу перехідного процесу на 18%,

2) середнє відхилення вектора змінних стану реального процесу від еталонного зменшено на 13% порівняно з показниками відомих адаптивних систем керування.

Синтезований нечіткий логічний регулятор надає системі автоматичного регулювання здатність підтримувати на заданому рівні температуру сушарки за наявності зовнішніх збурень, а також якісно керувати технологічним процесом сушіння капілярно-пористих матеріалів при широкому діапазоні зміни його параметрів у часі.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Chopra S., Mitra R., Kumar V. Analysis of Fuzzy PI and PD Type Controllers Using Subtractive Clustering. International journal of computational cognition, 2006. 4(2): p. 30-34.
2. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology //IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. No. 4. P. 5599-576.
3. Bounemour A., Chemachema M., Essounbouli N. New approach of robust Direct Adaptive Control of a class of SISO Nonlinear Systems, in 15th international conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering - STA'2014., 2014: Hammamet, Tunisia. p.725-730.
4. Filasov'a A., Hladk'y V., Krokavec D. Nonlinear System  $H_\infty$  Fuzzy Control within Takagi-Sugeno Framework, in International Conference on Process Control (PC) June 18–21, 2013, Štrbské Pleso, Slovakia. 2013. p. 13-18.
5. Harpreet Singh, Madan M. Gupta, Thomas Meitzler, et al., —Real-Life Applications of Fuzzy Logic, Advances in Fuzzy Systems, vol. 2013, Article ID 581879, 3 pages, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/581879>
6. Aceves-Lopes A. A simplified version of Mamdani's fuzzy controller: the natural logi controller. IEEE Transactions on fuzzy systems, 2006. 14(1): p. 16-30. DOI: [10.1109/TFUZZ.2005.861603](https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2005.861603)
7. Ion Iancu (2012). A Mamdani Type Fuzzy Logic Controller, Fuzzy Logic - Controls, Concepts, Theories and Applications, Prof. Elmer Dadios (Ed.), ISBN: 978-953-51-0396-7.
8. Ковриго Ю.М. Fuzzy-регулятор для керування інерційними технологічними параметрами котлоагрегату ТЕС / Ю.М. Ковриго, О.С.Бунке, П.В. Новіков / Nauka i Studia NR 8 (169) 2017 – с. 76-84.
9. Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide, Version 2.1 The MathWorks, Inc., 2001.

Received (Надійшла) 22.08.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.10.2022

### Synthesis of an adaptive fuzzy logic regulator for temperature control in a chamber dryer

N. Yevsina, A. Zuev, A. Gapon, M. Denysenko, M. Tarasenko

**Abstract.** The method of statistics is the synthesis of a fuzzy logical temperature controller for drying capillary-porous materials, which allows you to win a standard form for describing linguistic changes and the minimum set of key rules. It is indicated that the simplicity of the PID controller, as expressed through the three parameters of the adjustment and the understanding of the physical protection of the skin, at the same time, it increases the number of tasks, which can be effectively changed. For folding thermal objects, it is necessary to complete the structure of the regulator more thoroughly. It is recommended to win over vague management with insufficient knowledge of how the object of management is, but even the obviousness of managing it. The fuzzy controller is based on the vibration control, which controls, in the range of changing the dynamic pardon of the regulation and  $\bar{u}$  similarly to  $\bar{u}$  threshold values. **Synthesizing** a fuzzy logical controller allows the system of automatic regulation of the building to adjust the temperature of the dryer at a given level for the presence of major disturbances, as well as accurately handle the technological process of drying capillary-porous materials with a wide range of changes.

**Keywords:** capillary-porous materials, fuzzy control, adaptive fuzzy logic controller, mathematical model, membership function, defuzzification.

М. Й. Заполовський, М. В. Мезенцев

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

## ОПТИМІЗАЦІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ СИНТЕЗУ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЗМІННОГО СТРУМУ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМУ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛІННЯ

**Анотація.** Розглянуті питання розроблення оптимізаційної моделі для синтезу системи керування тяговим електроприводом змінного струму дизель-поїзда та її дослідження, з використанням сучасних методів оптимізації на основі математичних моделей і алгоритмів векторного способу управління. В процесі рішення: розроблено математичні моделі елементів систем тягового електроприводу дизель-поїзда з урахуванням протікання в них електромагнітних процесів; проведено аналіз і вибір методів оптимізації та критеріїв якості, характерних для даного типу об'єктів керування, які можливо використовувати для синтезу системи управління електроприводу дизель-поїзда з урахуванням математичної моделі, яка описує динамічні процеси; проведено розроблення оптимізаційних моделей системи керування електроприводу електропередачі дизель-поїзда з використанням характерних для даного типу електропередачі критеріїв якості; виконані дослідження та уточнення на оптимізаційних моделях структур і параметрів системи керування як з відомими законами управління, так і з запропонованими в процесі синтезу.

**Ключові слова:** оптимізаційна модель, електропривід змінного струму, синтез, методи оптимізації, математичні моделі, критерії якості, динамічні процеси, дослідження та уточнення, структури.

### Вступ

Розроблення оптимізаційних математичних моделей для синтезу системи керування електроприводом змінного струму з використанням сучасних методів проектування, методів оптимізації з урахуванням особливостей об'єкта керування, різного роду програм і пакетів моделювання, проведення комплексних досліджень за допомогою моделей та отримання якісних характеристик функціонування системи керування в замкнутій системі управління в залежності від умов експлуатації та рівня навантаженості дизель-поїзда є складовою частиною загального завдання створення енергоекономної системи управління засобами залізничного транспорту.

**Постановка задачі розроблення моделі.** На сьогоднішній день наряду з частотним способом керування електроприводом (закон керування  $U/f=const$ ), все більшої уваги приділяється розробкам систем керування на основі алгоритмів векторного управління [1 – 10]. Основна ідея алгоритму векторного управління полягає в змозі орієнтування потоку асинхронного двигуна (АД), що дає можливість розроблення систем керування електроприводом, яка забезпечує підтримку постійного значення електромагнітного моменту двигуна при змінах його навантаження.

Регулювання моменту здійснювалося тільки зміною роторної складової струму, що створює момент двигуна. В результаті система керування містить два канали управління: по тяговому моменту і потокозчепленню. Ці алгоритми активно впроваджується у різного роду електроприводах трифазного струму. Напроти статора системи рівняння математичної моделі асинхронного двигуна визначаються по рівняннях векторного управління.

Це важливо для об'єктів, наприклад, станків для обробки деталей за допомогою різальних інструментів. За допомогою алгоритму векторного управління можливо побудувати систему керування,

яка забезпечує стабілізацію певних струмів, а значить і самого електромагнітного моменту.

Характерною особливістю тягового електроприводу дизель-поїзда є те, що важливою експлуатаційною характеристикою являються енергетичні витрати. В залежності від профілю шляху, завантаженості при одній і тій же величині моменту, енергетичні витрати будуть різні. Для розроблення оптимізаційної моделі використано математичну модель алгоритму векторного управління, але за умови, що значення модуля потокозчеплення не стабілізується, а може змінюватися згідно заданого або синтезованого закону керування. При цьому ефективність функціонування системи керування оцінюється заданим критерієм якості.

В результаті отримана математична модель у вигляді системи диференціальних рівнянь другого порядку, де фазовими змінними виступають швидкість руху дизель-поїзда та модуль потокозчеплення. В якості критерія ефективності використовуються показник енергетичних витрат. Це дозволяє проводити синтез управлінь з використанням методів варіаційного числення.

Для оцінки синтезованих управлінь використано порівняння отриманих значень перехідних процесів перемінних АД (потокозчеплень, фазних струмів, ковзань) із значеннями перехідних процесів при залученні відомого закону управління  $U/f = Const$ .

Для реалізації математичної моделі використано пакет MATLAB. Що до рішення даних задач у своєму складі він має об'єктно-орієнтовану алгоритмічну мову, графічний інтерфейс, засоби розв'язання задач математичного аналізу, оптимізації, обчислювальної математики, аналізу і синтезу систем автоматичного керування та ряд інших інструментів.

**Метою роботи** є розроблення моделей для синтезу системи керування електроприводом змінного струму дизель-поїзда та їх дослідження як з відомими

ми законами управління, так і з використанням моделі алгоритму векторного управління, проведення їх досліджень, отримання якісних характеристик протікання перехідних процесів в елементах електроприводу дизель-поїзда шляхом моделювання.

### Основна частина

Згідно [4, 5] математичну модель електроприводу з урахуванням алгоритму векторного керування можливо подати в наступному вигляді:

$$U_{s1} = \frac{dI_{s1}}{dt} L_X + K_r \frac{d\Psi_{r1}}{dt} - I_{s2} L_s' \omega_\Psi + R_s I ; \quad (1)$$

$$U_{s2} = \frac{dI_{s2}}{dt} L_X + I_{s1} L_s' \omega_\Psi + K_r \Psi_{rm} + R_s I_{s2} ; \quad (2)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{rm}}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \Psi_{rm} - I_{s1} \frac{L_m R_r}{L_r} ; \quad (3)$$

$$0 = \beta \Psi_{rm} - \frac{R_r L_m}{L_r} I_{s2} ; \quad (4)$$

$$M_d = \frac{mpK_r}{2} \Psi_{rm} I_{s2} , \quad (5)$$

де  $L_s' = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$ ,  $K_r = \frac{L_m}{L_r}$ ,  $m$  – число фаз,  $p$  – число пар полюсів,  $K_r$  – коефіцієнт зв'язку ротора,  $\omega$  – швидкість обертання ротора.

Оскільки швидкість обертання координат співпадає із швидкістю вектору потоку ротора  $\omega_k = \omega_\Psi$ , то вектор  $\Psi_r$  буде на осі 1 своїм модулем  $\Psi_{rm}$ , а його проекція на вісь 2 дорівнює нулю.

Згідно системи рівнянь потік ротора  $\Psi_{rm}$  повинен бути стабільним, отже стабільним і струм  $I_{s1}$ . Рівняння (1 – 5) при цьому спрощуються:

$$U_{s1} = R_s I_{s1} - I_{s2} L_s' \omega_\Psi ; \quad (6)$$

$$U_{s2} = R_s I_{s2} + I_{s1} L_s' \omega_\Psi + K_r \Psi_{rm} \omega_\Psi + \frac{dI_{s2}}{dt} L_s' ; \quad (7)$$

$$\frac{R_r}{L_r} \Psi_{rm} - I_{s1} \frac{L_m R_r}{L_r} = 0 ; \quad (8)$$

$$\frac{R_r}{L_r} \Psi_{rm} - I_{s1} \frac{L_m R_r}{L_r} = 0 . \quad (9)$$

З рівняння (8) виходить закон формування струму  $I_{s1}$ , що визначає потік:

$$I_{s1} = \frac{1}{L_m} \Psi_{rm} . \quad (10)$$

З рівняння (5) виходить закон формування струму  $I_{s2}$ , що визначає момент:

$$I_{s2} = \frac{M}{\Psi_{rm}} \frac{2}{mpK_r} . \quad (11)$$

З рівняння (9) знаходиться величина абсолютного ковзання  $\beta$ , що визначається моментом і потіком зв'язку:

$$\beta = \frac{R_r L_m}{L_r} \frac{I_{s2}}{\Psi_{rm}} . \quad (12)$$

Необхідна швидкість обертання поля ротора визначається як:

$$\omega_\Psi = p\omega + \beta . \quad (13)$$

Дослідження системи керування за допомогою розробленої моделі показало малий вплив  $\beta$  на перехідні процеси, тому можливо прийняти [4, 5]:

$$\omega_s = \omega_\Psi . \quad (14)$$

Формування модуля вектору напруги  $U_{x1}$  математичної моделі тягового асинхронного двигуна (ТАД) в синхронній системі координат для регулювання напруги живлення виконується на основі ортогональних складових вектору напруги по зворотній моделі двигуна, які обчислюються згідно формул:

$$U_{s1} = R_s I_{s1} - I_{s2} L_s' \omega_\Psi ; \quad (15)$$

$$U_{s2} = R_s I_{s2} + \omega_s \Psi_{rm} \left( \frac{L_s'}{L_m} + K_r \right) . \quad (16)$$

З урахуванням рівнянь (10) та (11) в результаті отримаємо:

$$U_{s1} = (R_s / L_m) \Psi_{rm} - \frac{M}{\Psi_{rm}} \frac{2}{mpK_r} L_s' \omega_s ; \quad (17)$$

$$U_{s2} = R_s \frac{2}{mpK_r} \frac{M}{\Psi_{rm}} + \omega_s \Psi_{rm} \left( \frac{L_s'}{L_m} + K_r \right) ; \quad (18)$$

$$\beta = \frac{R_r L_m}{L_r} \frac{2}{mpK_r} - \frac{M}{\Psi_{rm}} \frac{1}{\Psi_{rm}} . \quad (19)$$

З урахуванням значень параметрів тягового двигуна дизель-поїзда ( $R_s = 0.083$  (Ом);  $R_r = 0.068$  (Ом);  $L_m = 0.0866$  (мГн);  $L_s = 0.0880$  (мГн);  $K_r = 0.982$ ;  $L_s' = 0.003$  (мГн);  $L_r = 0.088215$  (мГн)) ортогональні складові вектору напруги та величина абсолютного ковзання  $\beta$  визначаються як:

$$U_{s1} = 0.958 \Psi_{rm} - 0.000679 \frac{M}{\Psi_{rm}} \omega_s ; \quad (20)$$

$$U_{s2} = 0.0188 \frac{M}{\Psi_{rm}} + 1.017 \omega_s \Psi_{rm} ; \quad (21)$$

$$\beta = 0.0151 \frac{M}{\Psi_{rm}} \frac{1}{\Psi_{rm}} ; \quad (22)$$

Модуль вектору напруги живлення для математичної моделі ТАД визначається на основі рівнянь (20) і (21):

$$U_{x1} = \sqrt{U_{s1}^2 + U_{s2}^2} . \quad (23)$$

В результаті отримали математичну модель формування модуля вектору напруги  $U_{x1}$  та величини абсолютного ковзання  $\beta$  для математичної

моделі двигуна в синхронній системі координат на основі алгоритму векторного управління з урахуванням конкретних конструктивних параметрів ТАД електроприводу дизель-поїзда, яка в подальшому, сумісно з моделлю ТАД в синхронній системі коор-

динат була використана для дослідження можливих законів керувань.

Структурна схема моделі формування складових керувань  $U_{x1}$  та  $w_s$  на основі рівнянь (20) - (23) приведена на рис. 1.

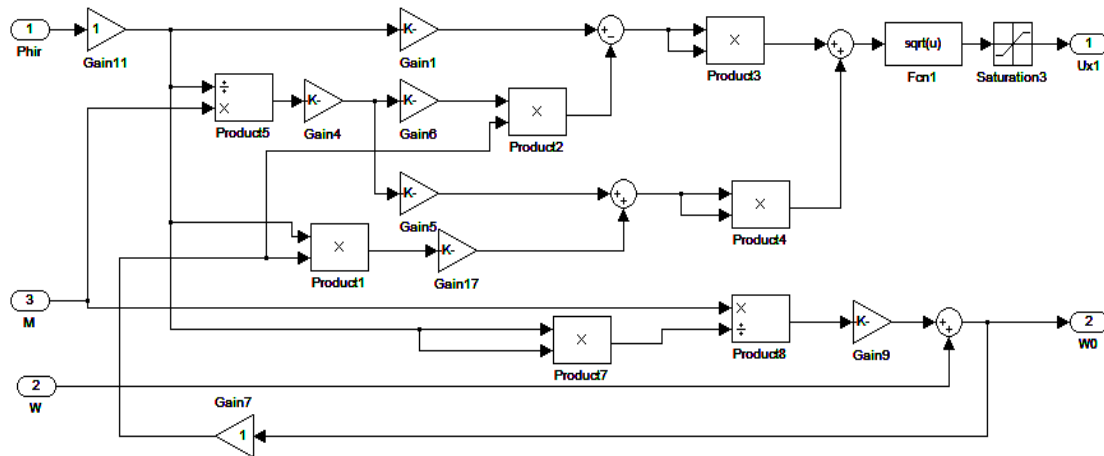


Рис. 1. Структурна схема моделі формування складових керувань

В процесі досліджень створена узагальнена модель електромеханічної системи дизель-поїзда, яка включає в себе наступні блоки моделей: формування керувань на основі математичної моделі – рівняння (20) – (23); моделі тягового електроприводу та формування швидкості дизель-поїзда [4]. Сигналами управління для моделі тягового електроприводу являються модуль вектору напруги живлення ТАД  $U_{x1}$  та його частота  $\omega_0$  (швидкість обертання поля ротора), які формуються на основі відомих законів керування (наприклад,  $U/f = const$ ), синтезованих або запропонованих. Як один з варіантів можливо формувати закони керування з використанням алгоритму векторного управління на основі інформації поведінки зміни тягового моменту та поточкозчеплення, як управління.

Формування частоти  $\omega_0$  (швидкості обертання поля ротора) виконується з використанням сигналу механічної частоти  $\omega$  (рівняння (13)), який отримується на виході блоку моделі електроприводу.

У даній моделі розглядається оптимізаційний показник – енергетичні витрати при переміщенні об'єкту управління на задану відстань до певної швидкості. Витрати визначалися як

$$J = \int_{t_0}^T U_{1m} I_s dt,$$

де  $U_{1m}$  – амплітудне значення напруги живлення ТАД (В),  $I_s$  – струм навантаження (А).

За допомогою узагальненої моделі проведено дослідження можливих законів керування, таких як  $U/f = const$ , та законів керування з використанням алгоритму векторного управління на основі інформації поведінки зміни тягового моменту та поточкозчеплення.

Так, при проектуванні систем керування електроприводу змінного струму, в яких застосовуються

тягові асинхронні двигуни (ТАД), одним із способів управління використовується закон керування  $U/f = const$ . Однак, для конкретної системи, в нашому разі це стосується електроприводу дизель-поїзда, необхідно визначити чисельне співвідношення цього закону та значення темпу зміни частоти  $f$  напруги живлення  $U$ .

У зв'язку з цим дослідження проводились для певної величини завантаженості дизель-поїзда (розрахунковій, номінальній і максимальній) та темпу наростання частоти напруги живлення ТАД. При цьому величина завантаженості визначалась коефіцієнтом  $p/J$ . Відповідно коефіцієнти приймали значення: 0.000071; 0.000066; 0.000063.

Характерні результати дослідження системи керування електроприводу при законі керування  $U/f = const$  приведені в таблицях 1 – 3. При цьому аналізувались графіки зміни модуля поточкозчеплення, частоти скочвання, тягового моменту, швидкості дизель-поїзда при різних чисельних значеннях  $U/f$ , рівнях завантаженості дизель поїзда та витрати енергії електропередачі за час розгону.

Аналіз процесів показує, що при допустимих межах завантаженості і темпі наростання сигналу управління до 0.7 Гц/сек процес розгону носить стійкий характер і параметри системи (величина тягового моменту, величина ковзання, швидкість дизель-поїзда) знаходяться в допустимих межах, які задаються технічними вимогами. При темпі наростання сигналів керування більше за 0.7 Гц/сек система керування не забезпечує нормальне функціонування. Так, при темпі наростання сигналів керування 0.8 Гц/сек, величина ковзання при максимальному завантаженні виходить за допустиму (не реальну) величину. При цьому і тяговий момент ТАД не відповідає технічним вимогам.

В табл. 1 – 3 приведені цифрові значення відповідних змінних моделі ( поточкозчеплення ( $\Psi_{rm}$ , В), швидкості руху дизель-поїзда ( $V$ , км/год), ви-

трат енергії ( $P$ , кВт\*сек), тягового моменту ( $M$ , Нм), частота скочвання ( $\omega_0 - \omega$ ) при відповідній завантаженості дизель-поїзда та темпі наростання сигналів керування ( $p/J=0.000071$ ,  $p/J=0.000066$ ,  $p/J=0.000063$  за  $t=100$  сек.; темп наростання частоти – 0.4 та 0.7 Гц/сек.) в залежності від конкретних значень закону управління  $U/f = const$ .

Із табл. 1 видно, що при заданому темпі наростання частоти напруги живлення ТАД за умови використання законів управління  $U/f = const$  в діапазоні їх можливих робочих від 8 до 14, значення величини тягового моменту залишається практично постійним, при зменшенні значення відношення  $U/f = const$  швидкість руху зменшується, а витрати енергії збільшуються. При цьому величина скочвання збільшується. Це дає підстави для заключення, що модель адекватна і являється можливою для проведення досліджень.

В табл. 2 приведено результати досліджень при заданому темпі наростання частоти напруги живлення ТАД за умови різного рівня завантаженості при використанні закону управління  $U/f = 10$ .

Таблиця 1 – Результати досліджень ( $p/J=0.000071$ ,  $t=100$  с.; темп наростання частоти – 0.4 Гц/с.)

$U/f$ , В/Гц	$\Psi_{rm}$ , В	$V$ , км/год	$P^*10$ , МВт	$M$ , Нм	$\omega_0 - \omega$ , рад/сек
14	2.21	38.34	2.67	925	2.991
10	1.57	37.83	2.70	925	6.268
8	1.25	37.01	3.05	925	11.64

Із табл. 2 видно, що при заданому темпі наростання частоти напруги живлення ТАД за умови різного рівня завантаженості при використанні закону управління  $U/f = 10$ , темпі наростання частоти напруги живлення ТАД – 0.4 Гц/сек значення величини тягового моменту зростає в залежності від збільшення завантаженості дизель-поїзда, що є нормальним явищем. При цьому звичайно проявляється і збільшення затраченої енергії для досягнення однієї і той же швидкості в кінцевий термін часу. Характерним процесом при цьому є те, що практично для можливих завантажень залишається постійною величина частоти скочвання та потокозчеплення. Це додатково, як і в попередньому результаті дослідження підтверджує, що згідно теорії положень електроприводу, розроблена модель з точки зору функціонування веде себе адекватним чином.

Таблиця 2 – Результати досліджень ( $U/f = 10$ ;  $t = 100$  с.; темп наростання частоти – 0.4 Гц/с.)

$p/J$	$\Psi_{rm}$ , В	$V$ , км/год	$P^*10$ , МВт	$M$ , Нм	$\omega_0 - \omega$ , рад/сек
0.000071	1.575	37.83	2.696	924.8	6.268
0.000066	1.573	37.76	2.900	985.3	6.766
0.000063	1.573	37.70	3.042	1026.	7.115

В табл. 3 приведено результати досліджень при критичному значенні темпе наростання частоти напруги живлення ТАД за умови максимального рівня завантаженості при використанні допустимих законів управління  $U/f = const$ .

Таблиця 3 – Результати досліджень ( $p/J=0.000063$ ,  $t=100$  с.; темп наростання частоти – 0.7 Гц/с.)

$U/f$ , В/Гц	$\Psi_{rm}$ , В	$V$ , км/год	$P^*10$ , МВт	$M$ , Нм	$\omega_0 - \omega$ , рад/сек
12	1.895	66.58	8.548	1728.0	8.587
11	1.734	66.19	9.472	1728.0	11.11
10	1.573	64.67	12.78	1793.0	21.68

В результаті досліджень встановлено, що максимальний (критичний) темп набору частоти напруги живлення ТАД становить 0.7 Гц/сек. Із табл. 3 видно, що оптимальним є закон керування  $U/f = 12$ . Так, при заданому темпі наростання частоти напруги живлення ТАД за умови розгону до однієї і тієї ж швидкості, мінімальними значеннями є споживча енергія і величина частоти скочвання. Як правило, ці показники вибираються як цільові (якісні) при синтезі оптимальних систем керування.

В загальному плані можна визначити, що розроблену модель, на якій проведено ряд досліджень законів управління, можливо застосувати при синтезі оптимальних законів керування електроприводом змінного струму в плані отримання їх достовірності і протікання характерних процесів в системах електроприводу. Наприклад, такими характеристиками можуть бути отримані при синтезі закону управління відношення амплітуди напруги живлення до її частоти  $U/f$ , темпі наростання швидкості дизель-поїзда в залежності від завантаження, значеннях енергетичних затрат.

Крім цього, за результатами досліджень можливо зробити висновок, що розроблена модель реально відображає процес функціонування електроприводу дизель-поїзда при допустимих навантаженнях і розглянутому методі управління з точки зору протікання електромагнітних процесів і, як результат, може бути використана для цілей дослідження синтезованих управлінь згідно інших алгоритмів керування.

За допомогою розробленої моделі також були проведені дослідження щодо використання можливих керувань згідно алгоритму векторного управління. Так, при побудові системи керування з використанням методів векторного управління передбачається, що здійснюється стабілізація потокозчеплення  $\Psi_{rm}$  і тягового моменту, який визначається завданням  $M_3$ . Такий принцип регулювання традиційний і використовується незалежно від того, в якій системі координат представляється модель об'єкту управління.

Формування законів зміни тягового моменту ТАД і потокозчеплення виконувалось згідно наступних співвідношень. За тяговим моментом:

$$M = 2000 - e^{-0.01t}; \quad M = 2000 - 1/5t;$$

$$M = 2000e^{-0.0008t}; \quad M = 1600 + 1200e^{-0.0325t}.$$

За потокозчепленням:

$$\Psi_{rm} = 12 / (2 + 0.01\omega); \quad \Psi_{rm} = 12 / (2 + 0.01\omega^* \omega);$$

$$\Psi_{rm} = (14 / (2 + 0.01\omega)) - e^{-0.01t};$$

$$\Psi_{tm} = 8.17 - 13 / ((14 / (2 + 0.1\omega)) - (1 / e^{0.01t})).$$

В процесі досліджень проведено аналіз перехідних процесів у вигляді осцилограм, отриманих на моделі, що демонструють функціонування систем електроприводу при визначених початкових умовах у замкненій системі керування. Сигнали керування формувались згідно запропонованих законів управління тяговим моментом ТАД та потокозчепленням. Ефективність відповідного закону управління оцінювалась за значеннями величини енергетичних витрат.

Результати дослідження моделі дизель-поїзда з електроприводом змінного струму приведено у вигляді табл. 4 та 5. Характер зміни значень потоко-

зчеплення та діапазон зміни його значень співпадають з характером процесів при відомому способі керування  $U/f = const$ , що було досліджено і приведено вище.

Відповідно до законів керування отримано показники витрат енергії (у вигляді споживчої потужності тяговим електроприводом та числових значень функціоналу) при розгоні дизель-поїзда при максимальній завантаженості в залежності від швидкості руху та пройденого шляху за певний проміжок часу ( $t = 100$  сек.).

Як критерій оптимальності використовувався критерій мінімуму енергетичних витрат при виконанні обмежень по величині пройденого шляху і швидкості в кінцевий момент часу.

Таблиця 4 – Результати досліджень ( $p/J=0.000063$ ,  $t=100$  сек.;  $\Psi_{tm} = 12 / (2 + 0.01\omega)$ ).

M	$\Psi_{tm}$ , В	V, км/год	$P*10$ , МВт	S, м	$\omega_0 - \omega$ , рад/сек	P/S, кВт/м	U/f, В/Гц
1	2.32	87.7	1.73	1105	3.86	1.56	14.68
2	2.29	87.4	1.72	1132	3.64	1.52	14.47
3	2.29	87.2	1.72	1130	3.62	1.52	14.49
4	2.22	87.8	1.75	1243	3.26	1.40	14.05

Таблиця 5 – Результати досліджень ( $p/J=0.000063$ ,  $t=100$  сек.;  $\Psi_{tm} = (14 / (2 + 0.01\omega)) - e^{-0.01t}$ )

M	$\Psi_{tm}$ , В	V, км/год	$P*10$ , МВт	S, м	$\omega_0 - \omega$ , рад/сек	P/S, кВт/м	U/f, В/Гц
1	2.28	88.9	1.71	1111	4.18	1.54	14.4
2	2.24	88.7	1.70	1139	3.94	1.49	14.2
3	2.25	88.4	1.70	1137	3.91	1.49	14.2
4	2.17	89.3	1.71	1254	3.55	1.36	13.7

Розглядалися варіанти впливу ряду можливих законів задання тягового моменту та потокозчеплення, як управління, в процесі розгону дизель-поїзда за заданий час  $t$  і оцінювались отримані характеристики (швидкість, пройдений шлях і енергетичні витрати). За отриманими даними досліджень можливо запропонувати певні закони керувань з точки зору їх ефективності за критерієм мінімуму енергетичних витрат.

Аналіз отриманих даних дає підстави запропонувати закон зміни за тяговим моментом згідно виразу

$$M = 1600 + 1200e^{-0.0325t},$$

за потокозчепленням:

$$\Psi_{tm} = (14 / (2 + 0.01\omega)) - e^{-0.01t}.$$

Такий висновок зроблено на основі наступного. Отримані дані для пропонуємих керувань в деякій мірі аналогічні даним отриманим по перехідним процесам в результаті досліджень використання відомого закону керування  $U/f = const$ . При цьому при різних рівнях завантаженості дизель-поїзда, такі показники як величина потокозчеплення, швидкість руху поїзда, пройдений шлях знаходились в межах, які визначаються експлуатаційними значеннями характеристик. Якщо порівняти дані перехідних процесів законів керування  $U/f = const$  і пропонуємого закону керування, із таблиці 5 видно, що в пропонуємому законі керування досягається

співвідношення  $U/f = 13.7$  при темпі наростання частоти напруги живлення ТАД 0.76 Гц/сек. Цей факт, крім мінімальних витрат енергії, додатково дає підтвердження про його доцільність використання.

Виходячи з проведених результатів дослідження за допомогою розроблених моделей на основі використання алгоритму векторного управління електроприводом можна зробити висновок, що запропоновані керування дозволяють оптимізувати роботу енергетичної системи дизель-поїзда в процесі розгону при робочих завантаженнях, забезпечуючи при цьому виконання заданих граничних умов по швидкості та пройденому шляху, а також проводити розроблення та дослідження аналогічних систем управління.

## Висновки

1. На основі розглянутих методів синтезу та урахуванням особливостей досліджуваного об'єкта слідує, що з метою побудови енерго-ефективної системи керування у вигляді математичних моделей для певних критеріїв якості та алгоритмів формування завдань у відповідності до векторного управління можуть бути використані методи варіаційного числення.

2. За умови застосування методів варіаційного числення для синтезу моделі енерго-ефективної системи керування пропонується використати оптимізаційний показник – енергетичні витрати при пере-



міщенні об'єкту управління (дизель-поїзда) на задану відстань до певної швидкості.

3. В результаті досліджень встановлено, що при заданому (критичному) темпі наростання частоти напруги живлення ТАД 0.7 Гц/сек за умови максимальної завантаженості дизель-поїзда і розгону до однієї і тієї ж швидкості при мінімальному значенні споживчої енергії і величині частоти ковзання, оптимальним є закон керування  $U/f = 12$ .

4. В процесі досліджень проведено аналіз перехідних процесів, отриманих на моделі, що демонструють функціонування систем електроприводу при використанні запропонованих управлінь тяговим моментом АД та потокозчепленням у замкненій системі керування. Отримані дані для пропонуємих керувань аналогічні даним отриманим по перехідним процесам в результаті досліджень використання відомого закону керування  $U/f = const$ , що дає підставу стверджувати про їх адекватність та працездатність.

5. Аналіз даних, які отримані в процесі досліджень, дає підстави запропонувати закон управління тяговим моментом та потокозчепленням у відповідності із співвідношеннями:

$$M = 1600 + 1200e^{-0.0325t}$$

$$\Psi_{rm} = (14 / (2 + 0.01\omega)) - e^{-0.01t}$$

6. В процесі досліджень встановлено, що при використанні запропонованого закону керування при різних рівнях завантаженості дизель-поїзда, такі показники як величина потокозчеплення, швидкість руху поїзда, пройдений шлях знаходяться в межах, які визначаються експлуатаційними значеннями характеристик. При цьому досягається співвідношення  $U/f = 13.7$  при темпі наростання частоти напруги живлення АД 0.76 Гц/сек. Цей факт, крім мінімальних витрат енергії, додатково (збільшення швидкодії) дає підстави про доцільність його використання.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Horstmann Daniel, Wagner Rudolf, Weigel Wolf-Dieter. 100 Jahre Entwicklung der Antriebsstechnik für elektrische Bahnen. Teil 2. // *Elek. Bahnen*. – 2003. – № 7. – P.338–345
1. 2. Усольцев А.А. Векторное управление асинхронными двигателями: Учебное пособие / А.А. Усольцев СПб: СПбГУ ИТМО, 2002. – 43 с.
2. Сандлер А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.
3. Рудаков В. В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.
4. Bose Bimal K. Modern Power Electronics and AC drives / Bimal K. Bose. – Prentice Hall PTR: Prentice-Hall Inc. – 2002. – 712 p.
5. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / [Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Заповловский Н.И., Леонов С.Ю.]. – Х.: ХФИ «Транспорт Украины», 2003. – 248 с.
6. Volkov A.V. Asynchronous motor drive based on self-excited current inverter with switched-off thyristors and provided with redicting relay and vector regulation of stator current / A.V. Volkov, I.A. Kosenko // *Published in Elektrotehnika*. – 2008. – No 10. – P. 6-17.
7. Пересада С.М. Грубое векторное управление моментом и потоком асинхронного двигателя / С.М. Пересада, С.Н. Ковбаса, В.С. Бовкунович // *Техн. електродинаміка*. – 2010. – № 1. – С. 60-66.
8. Заповловський М.Й. Синтез управлінь для оптимізації динамічних процесів електроприводу змінного струму / М.Й. Заповловський, М.В. Мезенцев, В.В. Скороделов // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – Вип. 4(50). Полтава. 2018. С. 38-41.
9. Заповловський М.Й. Математична модель для синтезу управлінь електроприводом змінного струму / М.Й. Заповловський, В.В. Скороделов, М.В. Мезенцев // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – Вип. 5(57). Полтава. 2019. С. 16-21.

Received (Надійшла) 08.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.11.2022

#### An optimization model for the synthesis of the control system of an alternating current electric drive based on the use of a vector control algorithm

M. Zapolovsky, M. Mezentssev

**Abstract.** Considered the issues of developing an optimization model for the synthesis of the AC traction electric drive control system of a diesel train and its research, using modern optimization methods based on mathematical models and vector control algorithms. In the process of the decision: mathematical models of the elements of the traction electric drive systems of the diesel train were developed, taking into account the flow of electromagnetic processes in them; the analysis and selection of optimization methods and quality criteria typical for this type of control objects, which can be used for the synthesis of the control system of the electric drive of a diesel train, taking into account the mathematical model that describes dynamic processes; the development of optimization models of the control system of the electric drive of the electric transmission of a diesel train using quality criteria typical for this type of electric transmission was carried out; studies and refinements were made on optimization models of the structures and parameters of the control system, both with known control laws and with those proposed in the synthesis process.

**Keywords:** optimization model, alternating current electric drive, synthesis, optimization methods, mathematical models, quality criteria, dynamic processes, research and refinement, structures.

А. М. Кльон<sup>1</sup>, А. В. Трет'як<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Донбаська національна академія будівництва і архітектури, Краматорськ, Україна

<sup>2</sup> Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

## ВИЗНАЧЕННЯ ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА БАШТОВИЙ КРАН ЗА ГОСТ 1451-77 ТА ДБН В.1.2-2:2006

**Анотація.** У статті розглянуте питання визначення вітрового навантаження на баштовий кран за двома нормативними документами: ГОСТ 1451-77 «Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. Нормы и метод определения» та ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи. Норми проектування». Методика, викладена в першому нормативному документі, не враховує змін, що відбулися в нормативній документації України за останні десятиліття, зокрема в області кліматології. Так, карта районування території колишнього СРСР за характеристичними значеннями вітрового тиску, наведена в додатку 3 до ГОСТ 1451-77, не збігається з відповідною картою районування України, яка наведена у ДБН В.1.2-2:2006. То ж у статті було поставлено задачу порівняння вітрового навантаження на кран, підрахованого за двома наведеними нормативними документами. Розрахунок, проведений для неробочого стану баштового крана із заданими параметрами, встановленого у третьому вітровому районі України, показав приблизне співпадіння результатів (похибка не перевищує 10-12%), однак про повну еквівалентність методик розрахунку за двома вказаними нормативними документами можна казати лише після додаткових досліджень. Крім того, ДБН В.1.2-2:2006 може застосовуватися як альтернативний стандарт при визначенні вітрового навантаження лише у певних випадках, оскільки не містить рекомендацій щодо розрахунку вітрового навантаження на баштовий кран у робочому стані та вітрового навантаження, діючого на вантаж.

**Ключові слова:** баштовий кран, вітрове навантаження.

### Вступ

**Мета роботи.** Порівняння вітрового навантаження на кран, підрахованого за ГОСТ 1451-77, з аналогічним навантаженням, визначеним за ДБН В.1.2-2:2006.

**Постановка проблеми.** При розрахунку металевих конструкцій, механізмів та стійкості баштових кранів, що працюють на відкритій місцевості, постає питання у визначенні вітрового навантаження на кран.

Основним нормативним документом, що дозволяє вирішити цю задачу, є ГОСТ 1451-77 «Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. Нормы и метод определения» [1].

Методика, викладена в цьому нормативному документі, рекомендується до застосування в спеціалізованій літературі, присвяченій розрахункам кранів [2-5]. І хоча ГОСТ 1451-77, не дивлячись на свій вік, досі є діючим, деякі його положення на сьогодні є застарілими та не враховують змін, що відбулися в нормативній документації України за останні десятиліття, зокрема в області кліматології.

Так, карта районування території колишнього СРСР за характеристичними значеннями вітрового тиску, наведена в додатку 3 цього стандарту, не збігається з відповідною картою районування України, яка наведена у ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи. Норми проектування» [6].

Тож інтерес викликає порівняння вітрового навантаження на кран, підрахованого за ГОСТ 1451-77, з аналогічним навантаженням, визначеним за ДБН В.1.2-2:2006.

Оскільки окремі елементи баштового крана (такі як башта та стріла) є по суті звичайними будів-

ельними металевими конструкціями, до них можна застосувати ті методи розрахунку, що викладені у документі [6].

### Основна частина

Згідно з нормативним документом [1], вітрове навантаження повинне визначатись як сума статичної та динамічної складових.

Статична складова вітрового навантаження, яка діє на  $i$ -й елемент конструкції крана або вантаж, визначається формулою:

$$F_i = A_i p_i, \text{ Н}, \quad (1)$$

де  $A_i$  – розрахункова площа  $i$ -того елемента конструкції крана або вантажу,  $\text{м}^2$ ;

$p_i$  – розподілене вітрове навантаження на одиницю розрахункової площі  $i$ -того елемента конструкції крана або вантажу.

$$p_i = q k c n, \text{ Па}, \quad (2)$$

де  $q$  – динамічний тиск вітру, Па;

$k$  – коефіцієнт, що враховує зміну динамічного тиску за висотою;

$c$  – коефіцієнт аеродинамічної сили;  $n$  – коефіцієнт перевантаження.

Усі величини, що входять до формули (2), є довідковими та визначаються за рекомендаціями, наведеними у нормативному документі [1].

При цьому розподілене вітрове навантаження  $p$ , а отже, і статичне вітрове навантаження  $F_i$ , визначається для двох станів крана: робочого та неробочого.

Розглянемо визначення вітрового навантаження для вантажу та основних елементів баштового

крана (башта, стріла) з наступними характеристиками:

номінальна вантажопідйомність 10т;

максимальна висота підйому 40м;

конструкція башти – гратчаста, поперечним перерізом 1,6 x 1,6м (квадрат),

коефіцієнт заповнення тіньової площі грані  $\varphi = 0,4$ , висота 45м;

конструкція стріли – гратчаста, поперечним перерізом 1,5 x 1,5 x 1,5 м (трикутник), коефіцієнт заповнення тіньової площі бічної грані = 0,3, довжина 40м.

В *робочому стані* динамічний тиск вітру для баштового крана, призначеного для будівельно-монтажних робіт,  $q = 125$  Па; коефіцієнт перевантаження  $n = 1$ .

Коефіцієнти  $k$  та  $c$  залежать від геометричних параметрів елементів крана, їх розташування над поверхнею землі та визначаються згідно з довідковими даними [1].  $k = k_{max} = 1,55$  – максимальне значення коефіцієнту, що враховує зміну динамічного тиску за висотою, для висоти 40м.

Для більш точних розрахунків башту слід розбити на окремі зони висотою до 10м та підрахувати для них окремі значення розподіленого вітрового тиску із врахуванням змінного коефіцієнту  $k$  по висоті башти [1].

Коефіцієнт аеродинамічної сили  $c = 2,47$  – для башти, яка є гратчастою конструкцією квадратного перерізу та складається зі стрижнів некруглого перерізу і з врахуванням коефіцієнту заповнення тіньової площі грані  $\varphi = 0,4$ ;  $c = 2,33$  – для стріли, яка є гратчастою конструкцією трикутного перерізу і з врахуванням коефіцієнту заповнення тіньової площі грані  $\varphi = 0,3$ ;  $c = 1,2$  – для вантажу.

За визначеним розподіленням вітровим навантаженням  $p_i$  згідно з рівнянням (1) розраховуються статичні складові вітрового навантаження  $F_i^{PC}$  на елементи конструкції крана та вантаж відповідно до розрахункової площі  $A_i$  граней башти та стріли, при цьому  $A_b = 10 \text{ м}^2$  – розрахункова площа вантажу для крана вантажопідйомністю 10т [1].

В *неробочому стані* динамічний тиск вітру для баштового крана залежить від зони його встановлення та, наприклад, для Донецької області (III зона) становить  $q = 450$  Па.

З урахуванням цього за формулою (2) визначаються значення розподіленого вітрового навантаження для основних елементів крана та вантажу  $p_i$ , а потім за формулою (1) – відповідні значення статичних складових вітрового навантаження  $F_i^{HC}$ .

Динамічна складова вітрового навантаження, що враховує пульсацію швидкості вітру, визначається за нормативно-технічною документацією або нормам проектування кранів даного типу.

Згідно з РД 22-166-86 «Краны башенные строительные. Нормы расчета» [7], динамічна скла-

дова вітрового навантаження, яка діє на  $i$ -тий елемент конструкції крана або вантаж, визначається за формулою:

$$S_i = m_n \xi F_i, \text{ Н}, \quad (3)$$

де  $m_n$  – коефіцієнт пульсації вітру, який залежить від висоти розташування опорного шарніру стріли  $H_0$ ;

для  $H_0 = 40$ м значення  $m_n = 0,105$ ;

$\xi$  – коефіцієнт динамічності, який залежить від періоду вільних коливань; для крана з прийнятими параметрами  $\xi \approx 2,55$  [7].

Для вантажу динамічна складова вітрового навантаження дорівнює 0,1 від статичного навантаження [7].

Розглянемо тепер визначення вітрового навантаження на елементи крана у неробочому стані згідно з ДБН В.1.2-2:2006.

В цьому разі граничне розрахункове значення вітрового навантаження визначається за такою формулою:

$$W_m = \gamma_{fm} W_0 C, \text{ Па} \quad (4)$$

де  $\gamma_{fm}$  – коефіцієнт надійності, який залежить від середнього періоду повторюваності (експлуатації)  $T$ , для  $T = 10$  років  $\gamma_{fm} = 0,69$ ;

$W_0$  – характеристичне значення вітрового тиску залежно від вітрового району, для півночі Донецької області (3 вітровий район)  $W_0 = 500$  Па;

$C$  – коефіцієнт, що визначається за формулою:

$$C = C_{aer} C_h C_{alt} C_{rel} C_{dir} C_d, \quad (5)$$

де  $C_{aer}$  – аеродинамічний коефіцієнт, що залежить від геометричних параметрів конструкції;

$C_h$  – коефіцієнт висоти конструкції, для конструкцій висотою 40м, встановлених на рівнинній місцевості,  $C_h = 2,25$  [6];

$C_{alt}$  – коефіцієнт географічної висоти, при розміщенні конструкції на висоті менше 0,5 км над рівнем моря  $C_{alt} = 1$ ;

$C_{rel}$  – коефіцієнт рельєфу, для рівнинної місцевості  $C_{rel} = 1$ ;

$C_{dir}$  – коефіцієнт напрямку, зазвичай дорівнює одиниці;

$C_d$  – коефіцієнт динамічності, що враховує пульсаційну складову вітрового навантаження, дорівнює 1,2 згідно табл. 9.9 [6].

Аеродинамічний коефіцієнт  $C_{aer}$  для просторових гратчастих конструкцій визначається такою формулою:

$$C_{aer} = C_x (1 + \eta) k, \quad (6)$$

де  $C_x, \eta, k$  – довідкові коефіцієнти, що визначаються за додатками до нормативного документу [6].

Для башти  $C_x = 1,4$ ;  $\eta = 0,48$ ;  $k = 1$ .

Для стріли  $C_x = 1,4$ ;  $\eta = 0,56$ ;  $k = 1$ .

Результати розрахунків зведемо у табл. 1.

Таблиця 1 – Вітрове навантаження (кН), діюче на елементи баштового крана та вантаж

Елементи крана / складові вітрового навантаження	Башта	Стріла	Вантаж
<b>Вітрове навантаження у робочому стані за ГОСТ 1451-77</b>			
Статична складова $F_i^{PC}$	13,8	8,1	2,3
Динамічна складова $S_6^{PC}$	3,7	2,2	0,2
Сумарне	17,5	10,3	2,5
<b>Вітрове навантаження у неробочому стані за ГОСТ 1451-77</b>			
Статична складова $F_i^{HC}$	49,6	29,2	-
Динамічна складова $S_6^{HC}$	13,4	7,9	-
Сумарне	63,0	37,1	-
<b>Вітрове навантаження у неробочому стані за ДБН В.1.2-2:2006</b>			
Сумарне	56,3	36,9	-

### Висновки

1. Вітрове навантаження на баштовий підйомний кран визначається за ГОСТ 1451-77 «Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. Нормы и метод определения», який на сьогодні не в повній мірі відповідає нормативно-технічній документації України.

2. Вітрове навантаження, яке діє на елементи крана у неробочому стані, можна визначати за ДБН В.1.2-2:2006, розглядаючи ці елементи як звичайні будівельні конструкції.

3. Як показав проведений розрахунок, вітрові навантаження на елементи крана у неробочому ста-

ні, розраховані за ГОСТ 1451-77 та ДБН В.1.2-2:2006 для баштового крана з визначеними параметрами та встановленого у третьому вітровому районі України, приблизно співпадають (похибка не перевищує 10-12%), однак про повну еквівалентність методик розрахунку за двома вказаними нормативними документами можна казати лише після додаткових досліджень.

4. ДБН В.1.2-2:2006 не може в повній мірі замінити собою ГОСТ 1451-77, адже не містить рекомендацій щодо розрахунку вітрового навантаження на кран у робочому стані та вітрового навантаження, діючого на вантаж.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- ГОСТ 1451-77. Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. Нормы и метод определения.
- Александров М.П. Подъемно-транспортные машины: Учеб. для машиностроит. спец. вузов. – 6-е изд., перераб. М.: Высш. шк., 1985. – 520 с.
- Вайнсон А.А. Подъемно-транспортные машины: Учебник для вузов по специальности «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» - 4-е изд., перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 536 с.
- Підйомно-транспортні машини: Розрахунки підймальних і транспортувальних машин: Підручник / В.С. Бондарев, О.І. Дубинець, М.П. Колісник та ін. - К.: Вища шк., 2009. – 734 с.
- Вантажопідйомні машини: Навч. посібник / О.В. Григоров, Н.О. Петренко. – Харків: НТУ "ХПІ", 2005. - 304 с.
- ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування.
- РД 22-166-86. Краны башенные строительные. Нормы расчета. СКТБ «Стройдормаш». М, 1987. – 62 с.

Received (Надійшла) 15.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.11.2022

### Determination of wind load on a tower crane according to GOST 1451-77 and DBN V.1.2-2:2006

A. Klyon, A. Tretiak

**Abstract.** The article examines the question of determining the wind load on a tower crane according to two normative documents: GOST 1451-77 "Hoisting cranes. Wind load. Norms and methods of determination" and DBN V.1.2-2:2006 "Loads and influences. Design standards". The methodology outlined in the first normative document does not take into account the changes that have taken place in the normative documentation of Ukraine over the past decades, particularly in the field of climatology. Thus, the zoning map of the territory of the former USSR according to the characteristic values of wind pressure, given in Appendix 3 to GOST 1451-77, does not coincide with the corresponding zoning map of Ukraine, which is given in DBN V.1.2-2:2006. Also, in the article, the task of comparing the wind load on the crane, calculated according to the two cited normative documents, was set. The calculation carried out for the non-working state of the tower crane with the specified parameters, installed in the third wind region of Ukraine, showed an approximate coincidence of the results (the error does not exceed 10-12%), however, the full equivalence of the calculation methods according to the two specified regulatory documents can be said only after additional research. In addition, DBN V.1.2-2:2006 can be used as an alternative standard when determining the wind load only in certain cases, since it does not contain recommendations for the calculation of the wind load on the tower crane in working condition and the wind load acting on the load.

**Keywords:** hoisting tower crane, wind load.

О. В. Червотока<sup>1</sup>, А. О. Подорожняк<sup>2</sup>, О. М. Чередніков<sup>1</sup>, І. М. Лаппо<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Державний НДІ випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

## АНАЛІЗ СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛЮВАННЯ ТА СПОСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

**Анотація.** Актуальним завданням забезпечення бойової готовності зразків військової техніки є розроблення нових і удосконалення відомих методів і засобів вимірювання температури з високими метрологічними характеристиками. Метою статті є дослідження метрологічних характеристик вимірювача температури та розробка пропозицій щодо застосування мікропроцесору для корекції похибок вимірювання температури. Проведено аналіз способів побудови систем терморегулювання космічних апаратів, розглянуто методи вимірювання температури для розробки цифрового вимірювача температури. Отримані результати можуть використовуватись при розробці, проектуванні та виготовленні мікропроцесорних вимірювачів температури, застосовуваних у системах терморегулювання для умов відсутності теплообміну вимірювача з навколишнім середовищем.

**Ключові слова:** система терморегулювання, вимірювання температури, мікропроцесорний вимірювач, статистичні методи корекції випадкових похибок.

### Вступ

#### Постановка проблеми у загальному вигляді.

Враховуючи сучасний розвиток військової техніки та впровадження передових інформаційних технологій виникає необхідність удосконалення та адаптації до сучасних умов існуючих систем забезпечення Збройних Сил України, зокрема, системи забезпечення якісного проведення вимірювань та випробувань.

До основних завдань, які необхідно вирішувати на етапі проведення вимірювань, можна виділити наступні: встановлення раціональної номенклатури параметрів, що підлягають вимірюванню та контролю; встановлення вимог до точності вимірювань і діапазонів вимірювань; розробка методів вимірювання та визначення складу засобів вимірювальної техніки; встановлення вимог до засобів вимірювальної техніки, призначених до застосування при створенні, експлуатації та випробуванні зразків військової техніки, до нормування їх метрологічних і експлуатаційних характеристик тощо [1-3].

Одним із основних факторів, який впливає на точність вимірювання, є температура. Вимірювання розподілу температури широко застосовується в авіакосмічній та військовій техніці для систем самонаведення на ціль, систем оповіщення про ранній запуск ракет, теплової розвідки, авіакосмічної зйомки тощо [4]. Проблема забезпечення необхідної точності вимірювальної інформації про стан сучасних видів військової техніки та засобів вимірювання температурних характеристик на етапах їх розробки, виробництва і експлуатації потребує проведення аналізу умов застосування, вимог на основні показники засобів вимірювальної техніки (точність, чутливість, діапазон вимірювань тощо) та надійності їх метрологічного забезпечення [5].

Отже, актуальним завданням забезпечення бойової готовності зразків військової техніки є розроблення нових і удосконалення відомих методів і засобів вимірювання температури з високими метрологічними характеристиками.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Засоби вимірювальної техніки, способи вимірювання температури і типи температурних датчиків в мікропроцесорних системах терморегулювання: розглянуто в роботах [6, 7].

Загальні питання розвитку методів вимірювання температурного розподілу розглянуто в [4], дослідження метрологічних характеристик вимірювачів наведено в [6], дослідження метрологічних характеристик цифрових датчиків температури досліджено в роботі [8]. Питання дослідження метрологічних характеристик мікропроцесорних вимірювачів у спеціалізованих вимірювальних системах розглянуто в роботі [9].

Обґрунтування можливих шляхів подальшого розвитку засобів вимірювальної техніки і випробувального обладнання механічних та кліматичних лабораторій наведено в [10].

Аналіз фахової літератури показав, що істотний внесок в розвиток теорії вимірювання температури зробили вчені Г. Рибо, П.Ф. Похил, В.М. Мальцев, Б.І. Олейник, О.А. Геращенко, Я.Т. Луцик, Б.І. Стадник, Ю.М. Туз, Р. J. Dyne, Х.М. Хашеміан та ін. Значний внесок в розвиток теорії динамічних вимірювань зробили М.Д. Вайсбанд, В.А. Грановський, П.П. Орнатський, І.П. Захаров, О.В. Полярус, В.М. Чинков, С.І. Кондрашов, Б.Ю. Цветков, Г.Г. Чуновкіна, Ю.С. Етингер, М. Раун, В. Mulhall, Т. Macher, D. Mowery, С.С. MacLeod, К. R. James, В. Kane та ін. [11].

У роботі [11] проаналізовано існуючі методи вимірювання температури, запропоновано використовувати для вимірювання температури коротких теплових імпульсів термодуру у перехідному режимі її роботи. Питання підвищення точності та достовірності температурних вимірювань при проектуванні та експлуатації двигунів літальних апаратів розглянуто в роботі [12].

Але у даних роботах не розглядається питання контролю теплового режиму бортової апаратури космічного апарату (КА). Як відомо, сучасна бортова електронна апаратура зазвичай працює в

обмеженому температурному діапазоні. Відхилення температури від допустимих границь може призвести до різних функційних порушень. Отже, забезпечення оптимального температурного режиму КА та його систем є актуальною науково-технічною задачею [13, 14]. З метою автоматизації процесів вимірювання температури доцільно використовувати цифрові вимірювачі температури на основі мікроелектронних виробів.

Отже, **мета статті** – дослідити метрологічні характеристики вимірювача та розробити пропозиції щодо застосування мікропроцесору для корекції похибок вимірювання температури в умовах відсутності теплообміну тіл з навколишнім середовищем.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Відомо, що у наземних умовах теплообмін тіл з навколишнім середовищем здійснюється головним чином молекулярною теплопровідністю і конвекцією (тобто рухом потоку) газової атмосфери під дією різниці температур блоків апаратури  $T$  і атмосферного середовища  $T_{сер}$ . Температура, як правило, характеризує швидкість (або кінетичну енергію) теплового руху молекул середовища.

Кількість тепла  $Q$ , яке може бути передано від блоків апаратури в газове середовище, визначається щільністю  $\rho$  і питомою теплоємністю газового середовища  $c_p$ :

$$Q = \rho c_p V (T - T_{сер}) \eta, \quad (1)$$

де  $V$  – об'ємна витрата газу, що омиває блоки апаратури;  $\eta < 1$  – коефіцієнт, що залежить від ефективності теплообміну.

Якщо тіло не виділяє тепла ( $Q = 0$ ), то воно набуває температуру навколишньої атмосфери ( $T = T_{сер}$ ). Ця температура зазвичай і використовується для характеристики теплового стану тіла в наземних умовах, коли атмосфера має досить високу щільність.

Умови навколишнього середовища на висотах орбіт штучних супутників Землі (~ 200 км): тиск відповідає глибокому вакууму (~ 10-6 ГПа), що унеможливує використання зовнішнього атмосферного середовища для регулювання теплового режиму бортової апаратури КА.

В умовах космічного вакууму щільність навколишнього середовища падає в мільярди разів і її здатність сприймати (або віддавати) тепло відповідно до виразу (1) для  $Q$  прагне до нуля. У фізичному відношенні це означає, що кількість молекул в одиниці газу стає настільки мала, що їх тепловий рух вже не може зробити помітного впливу на тепловий стан тіла незалежно від швидкостей їх руху, тобто температури газу. На тіло в космічному просторі діють більш потужні теплові потоки. Основним джерелом тепла є сонячне випромінювання, що дає потік теплової енергії, який на орбіті Землі дорівнює  $q_s = 1400 \text{ Вт/м}^2$  поверхні, перпендикулярної до сонячних променів. Цей тепловий потік називається сонячною сталою; величина її обернено пропорційна

квадрату відстані від Сонця (так, на орбітах Венери і Марса  $q_s$  відповідно становить  $2730 \text{ Вт/м}^2$  і  $610 \text{ Вт/м}^2$ ) [15].

Кількість тепла  $Q_s$ , сприйманого тілом, залежить від коефіцієнта  $A_s$  поглинання сонячного випромінювання поверхнею тіла, який зазвичай менше одиниці:

$$Q_s = A_s F_s q_s, \quad (2)$$

де  $F_s$  – поглинаюча поверхня тіла, що дорівнює його відносно, тобто площі проекції на площину, перпендикулярну сонячним променям;  $q_s$  – потік теплової енергії.

Інша частина сонячного потоку  $(1 - A_s) F_s q_s$  відбивається в простір. Тепловіддача від тіла в навколишнє космічне середовище буде здійснюватися шляхом інфрачервоного теплового випромінювання. Вона визначається законом променистого теплообміну (закон Стефана – Больцмана):

$$Q_{випр} = \varepsilon \sigma_0 F_{випр} (T^4 - T_{ср}^4), \quad (3)$$

де  $\varepsilon$  – ступінь чорноти поверхні тіла;  $\sigma_0 = 5,68 \times 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – стала Стефана-Больцмана;  $F_{випр}$  – випромінююча поверхня тіла;  $T$  – температура тіла;  $T_{ср}$  – середня температура космічного простору, що приблизно дорівнює абсолютному нулю.

Розглянемо, яку температуру мала би високо-теплопровідна кулька термометра, поміщена у вільний космічний простір далеко від планет (завдяки теплопровідності температура кульки буде однаковою по всьому об'єму). Ця рівноважна температура визначається з умови теплового балансу тіла  $Q_s = Q_{випр}$ :

$$T = \sqrt[4]{\frac{A_s q_s}{\varepsilon \sigma_0} \frac{F_s}{F_{випр}}} = \sqrt[4]{\frac{A_s q_s}{4 \varepsilon \sigma_0}}, \quad (4)$$

де для сфери маємо спрощення

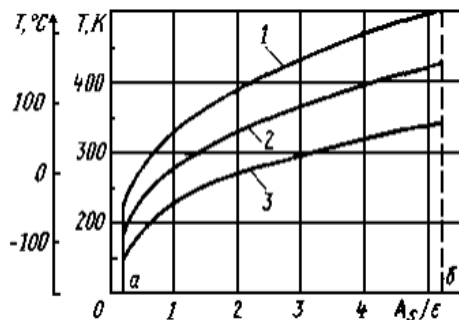
$$\frac{F_s}{F_{випр}} = \frac{\pi D^2}{\pi D^2} = \frac{1}{4}. \quad (5)$$

Коефіцієнти  $A_s$  і  $\varepsilon$  в отриманому виразі залежать від оптичних властивостей поверхні, показуючи, наскільки менше дана поверхня поглинає або випромінює енергію в порівнянні з абсолютно чорним тілом. Для сфери з полірованого алюмінію ( $A_s/\varepsilon = 0,26/0,05 = 5,2$ ) рівноважна температура становить  $423 \text{ К}$  ( $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ), для тієї ж сфери, покритої білою емалевою фарбою ( $A_s/\varepsilon = 0,18/0,95 = 0,189$ ),  $T = 184 \text{ К}$  (мінус  $89 \text{ }^\circ\text{C}$ ) на навколосонячній орбіті Землі.

З рис. 1 [16] видно, що температура тіла в космічному просторі може мати будь-які значення в залежності від властивостей його поверхні віддалення від Сонця. Крім того, для тіл несферичної форми (наприклад, циліндра) ця температура істотно залежить від орієнтації тіла відносно сонячних променів (торцем або боком) через різницю величини відношення поглинаючої і випромінюючої поверхонь  $F_s/F_{випр}$ ). Таким чином, температура тіла в космосі

визначається головним чином властивостями і параметрами самого тіла і температурних умов в космічному просторі, що набуває істотно інший зміст у порівнянні з наземними умовами.

Зазначені особливості теплового режиму тіл у космосі вимагають створення спеціальних технічних засобів, що підтримують задану температуру в відсіках КА і забезпечують виведення в зовнішнє середовище тепловиділення апаратури, розташованої в відсіках. Це завдання вирішується спеціальними системами терморегулювання (СТР).



**Рис. 1.** Залежність температури теплопровідної сфери в космосі від оптичних властивостей її поверхні  $A_s/\epsilon$  і віддалення від Сонця: 1 – орбіта Венери ( $1,08 \cdot 10^8$  км); 2 – орбіта Землі ( $1,49 \cdot 10^8$  км); 3 – орбіта Марса ( $2,26 \cdot 10^8$  км); а – поверхня покрита білою емалевою фарбою; б – полірована алюмінієва поверхня

Розглянемо призначення системи терморегулювання. В КА потрібна підтримка певного теплового режиму, що залежить від призначення апарату. Так для наукових приладів діапазон досить широкий:

- від ( $0^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ) до ( $40^\circ\text{C} \pm 15^\circ\text{C}$ ) і навіть в більш вузькому діапазоні для приймачів інфрачервоного вимірювання, оптичних систем;
- для пілотованих КА в відсіках розміщення екіпажу температура повинна підтримуватися в діапазоні ( $18^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ );
- в інших герметичних відсіках пілотованих КА і в відсіках автоматичних КА – від  $0^\circ\text{C}$  до  $+40^\circ\text{C}$ ;
- температурний режим агрегатів рухової установки від мінус  $50^\circ\text{C}$  до  $+40^\circ\text{C}$ ;
- для елементів, розташованих поза герметичними відсіками, температурний режим задається виходячи з вимог, що пред'являються до конструкції [16-18].

КА як самостійне небесне тіло знаходиться в теплообміні з навколишнім середовищем, але особливості космічного простору свідчать про те, що передача тепла від об'єкта до об'єкта, а також скидання тепла в навколишній простір, може бути здійснений лише шляхом випромінювання.

КА отримує тепло як від внутрішніх джерел: приладів, агрегатів, енергоустановок, так і від зовнішніх джерел:

- від прямого сонячного випромінювання;
- випромінювання, відбитого від планети;
- власного випромінювання планети;
- випромінювання, що виділяється при зітк-

ненні апарату з молекулами газу верхніх шарів атмосфери планети.

Загальне завдання забезпечення теплового режиму можна умовно розділити на внутрішнє і зовнішнє. Внутрішнє завдання полягає у регулюванні температури обладнання та елементів конструкції в відсіках КА і його окремих агрегатах. Зовнішня задача зводиться до забезпечення теплообміну КА з навколишнім середовищем в умовах космічного польоту.

Рішення завдання забезпечення теплового режиму пов'язане з організацією теплопередачі від джерел нагріву (нагрівачів) до стоків теплоти (холодильників). Способи теплопередачі – конвекція, теплопровідність (кондукція) і випромінювання (радіація) – мають на борту КА суттєві особливості використання.

Єдиний спосіб теплопередачі між КА і навколишнім середовищем – випромінювання (радіація), тому при проектуванні зовнішнього вигляду КА необхідно враховувати, що вся його зовнішня поверхня випускає, відбиває або поглинає ІЧ-випромінювання. Таким чином, при компонованні КА одна частина його поверхні може бути використана для пасивного і нерегульованого теплообміну, а інша частина – радіатори – для активного керованого теплообміну. Поверхня КА, теплообмін з якої небажаний, повинна екрануватися спеціальними теплоізоляційними покриттями.

В умовах космічного польоту конвекція обмежена і може бути здійснена тільки в межах обсягів, заповнених теплоносієм (наприклад, герметичних відсіків з газом або гідравлічних контурів з рідким теплоносієм). При цьому умови мікрогравітації на борту КА вимагають додаткових заходів з організації циркуляції теплоносія між нагрівачем і холодильником.

При кондукції слід враховувати, що незакриті ізоляцією елементи конструкції і бортового обладнання є тепловими мостами, за якими теплота перетікає і випромінюється (в тіні) або поглинається (на Сонці) в космічному просторі. Витоки через такі теплові мости – важливий фактор, що істотно зменшує можливості СТР.

В цілому тепловий режим КА описується рівнянням теплового балансу:

$$M \cdot c \frac{dT_{cp}}{dt} = \frac{T_{cp} - T_{rad}}{R_0} + Q_0 - Q_1,$$

де  $M$  – маса КА;  $c$  – теплоємність;  $T_{cp}$  – середня температура елемента;  $t$  – час;  $T_{rad}$  – температура випромінюючої поверхні, тобто радіатора;  $R_0$  – загальний тепловий опір між джерелами нагріву і радіатором;  $Q_0$  – кількість теплоти, що виробляється на борту космічного апарату;  $Q_1$  – витоки теплоти через теплові мости.

Найважливіша інформація для забезпечення теплового балансу – характеристики джерел нагріву, які можна поділити на зовнішні і внутрішні. При компонованні СТР КА необхідної вихідної інформацією є залежність зміни кута між напрямком на Сонце і осями зв'язаної системи координат КА від

часу польоту. Також потрібна інформація про час перебування КА в тіні. На цих ділянках сумарне тепловиділення внутрішніх джерел нагріву може бути збільшено за рахунок включення електронагрівачів СТР.

Тепловий потік, що сприймається КА від планети, залежить від орієнтації КА на різних режимах польоту і взаємної орієнтації Сонця, планети і КА. До зовнішніх джерел нагріву можна додатково віднести нагрів від зіткнення з молекулами розрідженої атмосфери (для низькоорбітальних КА) і перевідбивання ІЧ-випромінювання від елементів конструкції КА.

Внутрішні джерела нагріву, що встановлюються на борту КА: різні енергоустановки (турбіни, ядерні енергетичні установки, електричні рушійні установки), працюючі блоки апаратури, а також спеціальні нагрівачі СТР.

Енергоозброєність сучасних КА така, що забезпечення нормальних температурних режимів неможливо без потужної СТР. Система забезпечення теплового режиму КА складається з системи теплоізоляції та системи терморегулювання.

Система теплоізоляції, призначена для зменшення або обмеження теплових потоків, включає:

- оптичні покриття, що знижують некаліброване випромінювання теплоти з поверхні КА в космічний простір;
- теплоізоляційні покриття, що запобігають витоку тепла від приладів і агрегатів;
- теплові опори, що призначені для ізоляції теплових мостів.

Система терморегулювання, призначена для стабілізації і управління тепловим балансом КА, може бути заснована або на процесах поглинання чи виділення теплоти всередині КА, або на підводі чи відведенні теплоти ззовні. Системи терморегулювання поділяють на пасивні і активні.

Пасивні СТР служать для стабілізації поля температур і теплових потоків, а також для додання певних теплофізичних властивостей систем і устаткування КА. Для регулювання температури всередині КА можуть використовуватися реакції з поглинанням або виділенням теплоти, або зміна агрегатного стану речовини. До пасивних СТР відносяться:

- теплопроводи, що перерозподіляють теплові потоки всередині КА;
- теплоакумуляційні елементи (з можливою зміною агрегатного стану холодоагенту) згладжують різкі перепади температур і температурні градієнти;
- радіаційні поверхні, що призначені для каліброваного скидання надлишкової кількості теплоти в космічний простір.

Активні СТР призначені для управління тепловим балансом КА і, як наслідок, температурою окремих його елементів. Такі СТР включають в себе контури управління тепловими потоками, що складаються з об'єктів регулювання, датчиків, контролерів (керуючих бортових ЕОМ) і виконавчих органів. Виконавчими органами є:

- системи збору та перенесення теплоти;

– регульовані конвективні, термоелектричні, теплоакумуляційні і радіаційні теплообмінні апарати;

– системи формування циркуляційних полів для організації конвекції;

– нагрівальні елементи для підведення додаткової теплової енергії до охолоджених елементів конструкції КА [16-18].

Задачі контролю температури з точки зору збору і аналізу даних про об'єкт найбільш ефективно можна вирішувати за допомогою цифрових приладів, яким притаманний широкий діапазон вимірювання температури, максимально швидке отримання інформації, можливість інтегрування з будь-яким типом електронних систем.

Цифрові прилади мають показання у вигляді окремих дискретних сигналів вимірювальної інформації в цифровій формі. Загальні особливості побудови цифрових вимірювачів температури зв'язані з низьким рівнем сигналів первинних вимірювальних перетворювачів, високим рівнем завад нормального та спільного виду, необхідністю лінеаризації загальної функції перетворення, забезпеченням високої часової стабільності та малих змін їх показів у широкому діапазоні зміни температури [19, 20].

В основі процесу вимірювання температури лежить використання залежності фізичних властивостей певного тіла (об'єм, електричний опір, рівень випромінювання тощо) від температурних значень. З точки зору будь-якої автоматизованої системи, у тому числі кліматичної, температурні дані найдоцільніше передавати у вигляді електричної величини [21, 22]. Ця величина може бути постійною або переривчастою (постійний і переривчастий сигнал), і відповідно до цього розрізняють наступні види вимірювачів температури:

аналогові датчики, тобто датчики, які виробляють аналоговий сигнал. Серед усіх видів аналогових термодатчиків найчастіше застосовують терморезистори і термопари;

цифрові датчики, що генерують на виході двійковий код вимірюємої величини. До їх конструкції входять температурний сенсор (наприклад, температурно-залежний генератор), аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), перетворювач неелектричних величин в електричні сигнали, оперативна пам'ять тощо [23, 25];

сигнальні (бінарні, двійкові) датчики, які виробляють сигнал тільки двох рівнів (0/1) [21].

Аналіз спеціальної літератури показав, що терморезистивні перетворювачі мають ряд переваг у порівнянні з іншими типами вимірювальних перетворювачів: практично перекривають весь діапазон можливих температур на борту КА, та є довговічними, тому, пропонується використати саме їх при розробці системи терморегулювання.

Для збору даних з датчиків температури, що розташовані в СТР КА, слугує мікропроцесорний вимірювач температури (МВТ), структурна схема якого представлена на рис. 2, де:

ТП – термоперетворювач (служить для перетворення температури у опір терморезистора),



ОП – операційний підсилювач (служить для підсилення падіння напруги на терморезистивному датчику),

АЦП – аналогоцифровий перетворювач (служить для перетворення аналогового сигналу на виході операційного підсилювача в цифровий код),

АЛП – арифметикологічний пристрій (служить для обробки результатів вимірювань),

ОГ – опорний генератор (служить для синхронізації роботи мікропроцесорного пристрою МП),

БІ – блок індикації (служить для індикації результатів вимірювань у телеметричну систему КА).

Розробка моделі мікропроцесорного вимірювача температури була проведена в середовищі моделювання MATLAB та наведена на рис. 3, де:

БФВС – блок формування вхідного сигналу;

БФВТ – блок формування вимірюваної температури;

ТП – температурний перетворювач;

ОП – операційний підсилювач;

БФШС – блок формування шумового сигналу;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

АЛП – арифметико-логічний пристрій; МП – мікропроцесор;

БІ 1, БІ 2, БІ 3, БІ 4 – блоки індикації.

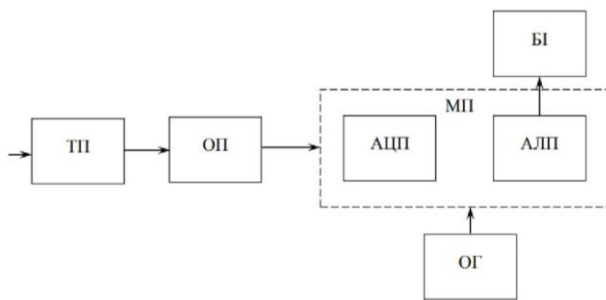


Рис. 2. Структурна схема мікропроцесорного вимірювача температури

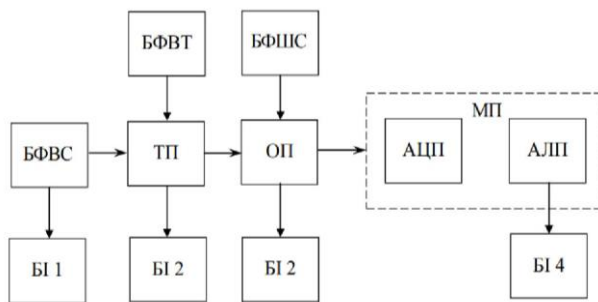


Рис. 3. Модель мікропроцесорного вимірювача температури

Розроблені структурна схема та модель мікропроцесорного вимірювача температури дозволяють провести подальше дослідження метрологічних характеристик вимірювача з метою підвищення якості вимірювання температури, а відповідно і якості підтримки заданого температурного режиму.

### Висновки та перспективи подальших досліджень

На сьогодні вимірювачі температури є одними із найбільш поширеними серед сучасних вимірювальних приладів та знаходять широке застосування в різних галузях науки і техніки.

Це і обумовлює актуальність теми дослідження, метою якої є аналіз систем терморегулювання та способів вимірювання температури для розробки системи терморегулювання та дослідження метрологічних характеристик мікропроцесорного вимірювача температури.

Отримані результати можуть використовуватись при розробці, проектуванні та виготовленні мікропроцесорних вимірювачів температури, застосовуваних у системах терморегулювання.

На основі аналізу результатів проведених досліджень можливо сформулювати пропозиції щодо застосування мікропроцесорів для корекції похибок вимірювання температури:

пропонується відмовитися від звичайного способу калібрування вимірювального приладу за допомогою вимірювального підсилювача і компенсаційного потенціометра, а перекласти завдання калібрування/корекції на мікроконтролер;

пропонується також використовувати статистичні методи корекції похибки мікропроцесорного вимірювача температури, призначені для зменшення випадкової складової похибки вимірювань, коли відомі статистичні характеристики похибки (оцінка інтервалу кореляції похибки, оцінка взаємної кореляційної функції похибки тощо).

В подальшому пропонується надати рекомендації з вибору інтервалу осереднення (кількості вимірів для осереднення) при застосуванні статистичних методів корекції похибки для зменшення імовірності помилки систем терморегулювання.

Отримані результати можуть використовуватись при розробці, проектуванні та виготовленні мікропроцесорних вимірювачів температури, які застосовуються у системах терморегулювання.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Павловський, О. Шляхи удосконалення системи метрологічного забезпечення в сучасних умовах розвитку Збройних Сил України / О. Павловський; О. Сова; В. Коваль // Journal of Scientific Papers "Social Development and Security". – Софія, Болгарія, 2021. – Vol. 11. – No. 4. – С. 169-176. DOI: 10.33445/sds.2021.11.4.15.
2. Войтенко, С.С. Особливості метрологічного забезпечення Повітряних Сил у локальних війнах останніх десятиріч / С.С. Войтенко, С.В. Герасимов // Системи озброєння і військова техніка. – Харків, 2008. – № 1(13). – С.42-46.
3. Кузнецов, І.Б. Метрологічне забезпечення та його вплив на ефективність застосування озброєння і військової техніки в сучасних умовах / І.Б. Кузнецов, О.В. Буяло, С.О. Пашков, П.А. Шкуліпа // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – Військово-спеціальні науки. – м. Київ, 2013. – № (1)30. – С. 12-15.
4. Озгович, А. Методи і засоби вимірювання розподілу температури / А. Озгович, О. Панчук // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2017. – № 78. – С. 34-41.

5. Концепція розвитку системи метрологічного забезпечення у сфері оборони на період до 2015 року та на перспективу до 2025 року. Ё К.: ЦУМІС, 2009. – 15 с.
6. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
7. Чинков, В.М. Цифрові засоби вимірювальної техніки військового призначення: підручник. Ч.2. – Х.: ХУПС, 2007. – 275 с.
8. Vovna, O.V. Study of Metrological Characteristics of Low-Cost Digital Temperature Sensors for Greenhouse Conditions / O.V. Vovna, I.S. Laktionov, O.O. Koufman, I. I. Stashkevych, V.A. Lebediev // Serbian journal of electrical engineering. – February 2020. – Vol. 17. – No. 1. – P. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.2298/SJEE2001001V>.
9. Кононов, В.Б. Дослідження метрологічних характеристик мікропроцесорних вимірювачів у спеціалізованих вимірювальних системах / В.Б. Кононов, О.В. Червогока, В.О. Лисяк, А.О. Подорожняк // Проблеми інформатизації: тези доповідей шостої міжнародної науково-технічної конференції. 14-16 листопада 2018 року – Черкаси: ЧДТУ; Баку: ВА ЗС АР, Бельсько-Бяла: УТІГН, Харків: НТУ "ХПИ"; 2018. – С. 133.
10. Обґрунтування можливих шляхів подальшого розвитку випробувального обладнання механічних, електричних та кліматичних лабораторій: звіт про НДР / Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки; керівн. Ю.М. Добришкін; вик. І.М. Лаппо [та інш.]. – Чернігів, ДНДІ ВС ОВТ, 2019. – 204 с.– Інв. № 2501
11. Козир, О.В. Підвищення точності вимірювання температури коротких теплових імпульсів: дис.. канд. техн. наук : 05.01.02 : / Козир Олег Васильович. – Київ, 2021. – 164 с.
12. Курская, Т.Н. Повышение точности и безопасности высокотемпературных измерений контактными датчиками / Т. Н. Курская // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : Сборник научных трудов национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». – Харьков «ХАИ», 2007. - № 1 (48) январь-март 2007. – С. 119-122.
13. Рассамкин, Б.М. Экспериментальное моделирование тепловых режимов малогабаритных космических аппаратов и их внешних тепловых потоков / Б.М. Рассамкин, В.А. Рогачев, В.И. Хоминич, Ю.В. Петров, С.М. Хайрнатов // Космична наука і технологія, 2002. – Т.8. – № 1. – С. 37-41.
14. Бромберг, Э.М. Тестовые методы повышения точности измерений / Э.М. Бромберг, К.Л. Куликовский – М.: Энергия, 1978. – 176 с.
15. Горлач, А.А. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике / А.А. Горлач, М.Я. Минц, В.Н. Чинков - Киев, 1985. – 156 с.
16. Гушин, В.М. Основы устройства космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 2001. – 272 с.
17. Серебряков, В.Н. Основы проектирования систем жизнеобеспечения экипажа космических летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1983. – 160 с.
18. Туманов, А.В. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов / А.В. Туманов, В.В. Зеленцов, Г.А. Щеглов / . – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 344 с.
19. Поліщук, Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка : підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько, Т.Г. Бойко ; за ред. проф. Є.С. Поліщука. – Львів : Видавництво «Бескид Біт», 2003. – 544 с.
20. V.D. Hall, M. Kuster, Metrological support for quantities and units in digital systems, Measurement: Sensors, vol. 18, 2021, 100102, <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100102>
21. Будова та види датчиків температури в кліматичних системах [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ds-electronics.com.ua>.
22. Zaporozhets, A., Burova, Z., Dekusha, O., Kovtun, S., Dekusha, L., Vorobiov, L., Ivanov, S. (2022). Information Measurement System for Thermal Conductivity Studying. In: Zaporozhets, A. (eds) Advanced Energy Technologies and Systems I. Studies in Systems, Decision and Control, vol 395. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85746-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85746-2_1)
23. Подорожняк А. О., Клименко А. М. Дослідження мікропроцесорної системи контролю температури серверної кімнати. Системи управління, навігації та зв'язку, 2017, № 2 (42), С. 51-54. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/667>
24. Babak V., Dekusha O., Dekusha Z. Hardware-Software System for Measuring Thermophysical Characteristics of the Materials and Products, CEUR Workshop Proceedings, vol. 3039, 2021, pp. 255-266. [Електронний ресурс] URL: <http://ceur-ws.org/Vol-3039/paper15.pdf>
25. Засоби вимірювань (датчики) в IoT [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://learn.ztu.edu.ua>.

Received (Надійшла) 22.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.11.2022

### Analysis of temperature control systems and methods of temperature measurement

O. Chervotoka, A. Podorozhniak, O. Cherednikov, I. Lappo

**Abstract.** The urgent task of ensuring the combat readiness of military equipment is the development of new and improvement of known methods and means of temperature measurement with high metrological characteristics. The purpose of the article is to study the metrological characteristics of the temperature digital measuring device and proposals for the application of microprocessor for correcting errors in temperature measurement. The analysis of ways of thermal control systems realization of spacecraft is carried out, methods of temperature measurement for the development of a digital temperature meter are considered. The results can be used in the development, design and manufacture microprocessor temperature measuring devices in thermal control systems.

**Keywords:** thermal control system, temperature measuring, microprocessor measuring device, statistical methods of random errors correction.

А. Н. Аль-Амморі, М. М. Дехтяр, Х. І. С. Абдусалам

Національний транспортний університет, Київ, Україна

## КОМП'ЮТЕРНІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

**Анотація.** Вирішення завдань аналізу та дослідження економічних, виробничих та управлінських процесів на транспорті базується на використанні новітніх комп'ютерних технологій (математичних та статистичних пакетів, електронних таблиць тощо). Останнім часом підвищений інтерес спостерігається до методів статистичного аналізу. У цій роботі як інструмент імовірно-статистичних розрахунків обрано математичний пакет Mathcad. Вибір Mathcad обумовлений тим, що він є потужною та універсальною системою комп'ютерної математики, призначеною для математичних розрахунків. Простота інтерфейсу Mathcad, широкий набір інструментів для комп'ютерної реалізації числових методів вирішення математичних завдань, якісна комп'ютерна графіка, можливість запису формул у їхньому природному вигляді зробили його одним із популярних інструментів математичних розрахунків. Важливим компонентом Mathcad є система програмування, яка має мову, наближену до традиційних професійних мов програмування, що значно розширює обчислювальні можливості Mathcad. Перевагою Mathcad є його відкритість для поповнення новими алгоритмами, функціями користувача та програмами. Робота об'єднує як теоретичну, так і комп'ютерну технології розрахунків із чисельної реалізації математичних моделей запропонованих завдань. Це дає можливість поглибити знання теорії статистичного аналізу, розвинути вміння у вирішенні завдань за наведеними комп'ютерними алгоритмами, розширити уявлення про сфери застосування методів статистичного аналізу для вирішення практичних завдань у галузі економіки, виробництва та управління.

**Ключові слова:** статистичний метод, повний експеримент, інформаційні технології, математична модель планування експерименту.

### Вступ

Планування експериментів передбачає визначення найбільш ефективного способу його проведення з метою одержання статистичного матеріалу, який має заздалегідь задані властивості. Планування експериментів застосовується при розв'язуванні задач оцінки параметрів розподілів, перевірки статистичних гіпотез при заданій потужності критерію, знаходження математичної моделі процесів із заданими статистичними властивостями, пошуку оптимальних значень за заданими критеріями умов протікання процесів. У даній роботі ми розглянемо математичні методи планування експериментів для вивчення механізму процесу, що спостерігається і побудови його статистичної моделі.

### Планування регресійних експериментів (статистичне моделювання)

Задача планування експериментів формулюється наступним чином: потрібно одержати деяке уявлення про поверхню відгуку, яка описується моделлю  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , де  $y$  – залежна змінна – відгук (наприклад, надійність приладу);  $x_i$  – незалежні змінні – фактори, що впливають на відгук, які можна варіювати у ході експерименту (наприклад, параметри навантаження приладу). Невідома функція відгуку частіше представляється поліномом  $k$ -го степеня

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i,j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \dots \quad (1)$$

де  $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}$  – коефіцієнти поліному.

Планування експерименту полягає у виборі на кожному етапі дослідження оптимального у прийнятих критеріях розташування експериментальних точок у просторі факторів. За критерії оптимальності планів використовуються:

- мінімізація числа випробувань;
- незалежність оцінок коефіцієнтів функції відгуку (ортогональність плану);
- однорідність дисперсій відгуку відносно центру плану (рототабельність плану);
- мінімізація об'єму еліпсоїда розсіяння оцінок коефіцієнтів моделі ( $D$ -оптимальність плану).

Найбільше застосування знайшли ортогональні плани у сполученні з критеріями  $D$ -оптимальності.

Як правило, поверхня відгуку відшукується у деякій визначеній області зміни факторів. Найбільш широко застосовується планування на двох рівнях (екстремальний експеримент), коли у експерименті використовуються значення факторів, які відповідають верхньому і нижньому рівню і позначаються  $+1$  і відповідно (або просто  $+1$  і  $-1$ ). Експериментальні плани, у яких усі фактори варіюються тільки на двох рівнях, називаються планами  $2^k$ , де  $k$  – кількість факторів, що варіюються.

При побудові плану експерименту потрібно виходити із деякого апріорного уявлення про можливий вигляд функції відгуку (лінійність, монотонність і т. інше). Спочатку область варіювання факторів визначається, виходячи із припущення про лінійність поверхні відгуку у середині цієї області. Якщо лінійна поверхня від-

гуку описує експериментальний матеріал неадекватно, то проводяться подальші експерименти по уточненню її вигляду за допомогою поліномів більш високого порядку.

### Лінійні ортогональні плани

**Повний факторний експеримент.** Планом, який дозволяє одержати незалежні оцінки коефіцієнтів рівняння поверхні відгуку, є повний факторний експеримент (ПФЕ). ПФЕ реалізує усі можливі неповторювані комбінації рівнів незалежних факторів.

У даному розділі ПФЕ розглядається стосовно до умов активного екстремального експерименту. Розглянемо ПФЕ для трьох факторів ( $k = 3$ ). Поверхня відгуку у цьому випадку має вигляд

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i < j}^k a_{ij} x_i x_j + a_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (2)$$

Нехай кожний фактор  $x_i$  варіюється від основного рівня  $x_{i0}$  на величину  $\pm \Delta x_i$ . Тоді за допомогою перетворення  $\tilde{x}_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}$  можна перейти до кодованих змінних  $\tilde{x}_i$ , що приймають на границях інтервалу варіювання  $x_i$  значення  $\pm 1$ . План екстремального експерименту прийнято записувати у вигляді матриці, яка визначає у кодованих змінних  $\tilde{x}_i$  умови проведення експерименту. У подальшому під  $x_i$  будемо розуміти кодовані змінні  $\tilde{x}_i$ . У літературі  $k$ -факторний ПФЕ зі зміною факторів на двох рівнях прийнято називати планом типу  $2^k$ . Наведемо приклад матриці ПФЕ для трьох факторів (табл. 1).

Таблиця 1 – Матриця повного факторного експерименту (ПФЕ)  $2^k$

Номер точки плану, j	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	Відгук $y_j$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	$y_1$
2	+	+	-	-	-	-	+	+	$y_2$
3	+	-	+	-	-	+	-	+	$y_3$
4	+	+	+	-	+	-	-	-	$y_4$
5	+	-	-	+	+	-	-	+	$y_5$
6	+	+	-	+	-	+	-	-	$y_6$
7	+	-	+	+	-	-	+	-	$y_7$
8	+	+	+	+	+	+	+	+	$y_8$

Для ПФЕ мають місце співвідношення ( $n = 2^k$  – кількість точок плану):

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 0 (i = 1, 2, \dots, 2^{k-1}); \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 = n; \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} x_{rj} = 0 (i \neq r; i, r = 0, 1, \dots, 2k - 1), \quad (4)$$

що відповідає властивості ортогональності стовпців матриці плану.

Будь-який план  $2^k$  може бути побудований за наступним правилом: у стовпці, який відповідає фактору  $x_i$ , знаки + і – чергуються через  $2^{i-1}$ . План  $2^k$  дозволяє оцінити  $2^k$  коефіцієнтів регресії  $a_i$ . Однак використовувати ПФЕ для оцінки коефіцієнтів при членах із кратністю не можна, оскільки оцінки для  $a_0$  і  $a_{ii}$  змішуються (наприклад, стовпці  $x_0$  і  $x_i x_i$  нерозрізними).

Основною перевагою ПФЕ є ортогональність матриці плану, що дозволяє суттєво спростити обчислення коефіцієнтів рівняння відгуку.

Для будь-якого числа факторів  $k$  вибіркові коефіцієнти  $a_i$  обчислюються за формулами:

$$a_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{ij} \bar{y}_j, \text{ де } \bar{y}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{ij},$$

де  $m$  – число паралельних випробувань у  $i$ -й точці плану,  $n$  – загальне число точок плану.

Дисперсія, яка характеризує розкид значень  $y_{jr}$ , при постійних умовах експерименту (тобто в одній точці плану), знаходиться за формулою

$$S_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_j)^2. \quad (6)$$

Загальна дисперсія, яка характеризує розкид відгуку безвідносно до умов експерименту, дорівнює

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j^2 = \frac{1}{n(m-1)} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_j)^2. \quad (7)$$

Якщо кількість паралельних випробувань у точках плану різна, то

$$S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (m_j - 1) S_j^2}{\sum_{j=1}^n (m_j - 1)}, \quad (8)$$

де  $m_j$  – число випробувань у  $j$ -й точці плану.

Попередньо однорідність дисперсій  $S_j^2$  повинна бути перевірена одним із методів.

Дисперсія коефіцієнта регресії  $a_i$  визначаються формулою

$$S_{a_i}^2 = \frac{1}{n(m-1)} S_y^2. \quad (9)$$

Коефіцієнт  $a_i$  рівняння відгуку з коефіцієнтом значущості  $\alpha$  визнається значущим, якщо  $|a_i| > t_{\frac{1+\alpha}{2}}(f) S_{a_i}$ , де  $t_{\frac{1+\alpha}{2}}$  – квантиль розподілу Стюдента при  $f = n(m-1)$  ступенях волі.

Для перевірки адекватності математичної моделі відгуку використовується дисперсія

$$S^2 = \frac{m}{n-d} \sum_{j=1}^n (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2, \quad (10)$$

де  $d$  – число коефіцієнтів апроксимуючого поліному;  $\hat{y}_j$  – значення відгуку, яке передбачається регресійною моделлю.

Адекватність моделі встановлюється порівнянням дисперсій  $S^2$  і  $S_y^2$  за допомогою критерію Фішера  $F = \frac{S^2}{S_y^2}$  при  $f_1 = n - d$  і  $f_2 = n(m-1)$  ступенях свободи.

Якщо усі коефіцієнти лінійної регресії (у тому числі і усі коефіцієнти при взаємодіях) є значущими, то  $d = n$  і не залишається ступенів волі для перевірки гіпотези адекватності. У цьому випадку рекомендується поставити випробування у центрі плану (тобто при значенні фактору  $x_i = 0$ ). Тоді, якщо  $|a_0 - \bar{y}_0| \leq S_y$ , де  $\bar{y}_0$  – середнє значення відгуку у центрі експерименту, лінійна модель визнається адекватною.

**Приклад 1.** Для ПФЕ  $2^3$ , наведеного у табл. 2, визначити рівняння відгуку і провести його статистичний аналіз.

Таблиця 2 – Матриця ПФЕ 2<sup>3</sup> і результати експерименту

	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	Відгук		
	1	2	3	4	5	6	7	8	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>
1	+	-	-	-	+	+	+	-	25	23	27
2	+	+	-	-	-	-	+	+	15	12	21
3	+	-	+	-	-	+	-	+	16	16	19
4	+	+	+	-	+	-	-	-	25	24	23
5	+	-	-	+	+	-	-	+	-20	-24	-22
6	+	+	-	+	-	+	-	-	24	21	24
7	+	-	+	+	-	-	+	-	-12	-14	-16
8	+	+	+	+	+	+	+	+	8	11	14

**Алгоритм розв'язання задачі**

1. Задання вхідних даних задачі: матриці планування експерименту і вектора значень відгуків.
2. Обчислення середніх значень відгуків.
3. Обчислення коефіцієнтів регресії рівняння відгуку.
4. Обчислення дисперсії значень відгуків, загальної дисперсії відгуків та дисперсії коефіцієнтів регресії.
5. Перевірка значущості коефіцієнтів регресії.
6. Знаходження вигляду рівняння регресії.
7. Перевірка адекватності математичної моделі відгуку за критерієм Фішера.
8. Побудова графіку точок відгуку і рівняння регресії.

**Алгоритм у Mathcad**

Вхідні дані:

Число випробувань і рівнів варіювання факторів

$$n := 8 \quad m := 3 \quad i := 0 \dots n - 1.$$

Матриця планування, значення відгуків і рівні факторів

$$x := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$y := \begin{pmatrix} 25 & 23 & 27 \\ 15 & 12 & 21 \\ 16 & 16 & 19 \\ 25 & 24 & 23 \\ -20 & -24 & -22 \\ 24 & 21 & 24 \\ -12 & -14 & -16 \\ 8 & 11 & 14 \end{pmatrix} \quad z := \begin{pmatrix} 5 & 2 & 4 \\ 4 & 2 & 3 \\ 9 & 4 & 7 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Середні значення відгуків

$$ys_i := \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=0}^{m-1} y_{i,j}, \quad (11)$$

$$ys^T = (25 \quad 16 \quad 17 \quad 24 \quad -22 \quad 23 \quad -14 \quad 11)$$

Коефіцієнти регресії рівняння відгуку

$$a_0 := \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} x_{i,0} \cdot ys_i, \quad (12)$$

$$a_1 := \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} x_{i,1} \cdot ys_i, \quad (13)$$

$$a_2 := \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} x_{i,2} \cdot ys_i, \quad (14)$$

$$a_3 := \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} x_{i,3} \cdot ys_i, \quad (15)$$

$$a_4 := \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} x_{i,4} \cdot ys_i, \quad (16)$$

$$a_5 := \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} x_{i,5} \cdot ys_i, \quad (17)$$

$$a_6 := \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} x_{i,6} \cdot ys_i, \quad (18)$$

$$a_7 := \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} x_{i,7} \cdot ys_i, \quad (19)$$

$$a^T = (10 \quad -8.5 \quad 0.5 \quad 10.5 \quad -0.5 \quad 9 \quad -0.5 \quad 4.5).$$

Дисперсія значень відгуків  $y_{i,j}$

$$S2_i := \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=0}^{m-1} (y_{i,j} - ys_i)^2, \quad (20)$$

$$S2^T = (4.0 \quad 21.0 \quad 3.0 \quad 1.0 \quad 4.0 \quad 3.0 \quad 4.0 \quad 9.0).$$

Загальна дисперсія

$$Sy2 := \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} S2_i, \quad Sy2 = 6.13. \quad (21)$$

Дисперсія коефіцієнтів регресії

$$Sa := \sqrt{S2a}, \quad Sa = 0.62. \quad (22)$$

Перевірка значущості коефіцієнтів регресії із рівнем значущості  $\alpha$  і визначення ступеня волі  $f$ :

$$\alpha := 0.05 \quad f := n \cdot (m - 1), \quad f = 16. \quad (23)$$

Квантиль розподілу Стьюдента

$$t_\alpha := qt \left( 1 - \frac{\alpha}{2}, f \right), \quad t_\alpha = 2.12. \quad (24)$$

Статистика Стьюдента для коефіцієнтів регресії

$$t_i := \frac{|a_i|}{Sa}, \quad (25)$$

$$t^T = (16.2 \quad 13.7 \quad 0.8 \quad 17 \quad 0.8 \quad 14.5 \quad 0.8 \quad 7.3).$$

Перевірка гіпотези про значущість коефіцієнтів регресії

$$Q_i := if(t_i < t_\alpha, 0, 1), \quad (26)$$

$$Q^T = (1 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1),$$

$$a_i := a_i \cdot Q_i, \quad (27)$$

$$a^T = (10 \quad -8.5 \quad 0 \quad 10.5 \quad 0 \quad 9 \quad 0 \quad 4.5).$$

Значення  $Q_i = 0$  означає, що відповідні коефіцієнти  $a_i$  є незначущими. Загальний вигляд рівняння регресії ( $Y1r_i$  і  $Y2r_i$  – складові загального рівняння) є таким:

$$Y1_i := a_0 + a_1 \cdot x_{i,1} + a_2 \cdot x_{i,2} + a_3 \cdot x_{i,3}, \quad (28)$$

$$Y2_i := a_4 \cdot x_{i,4} + a_5 \cdot x_{i,5} + a_6 \cdot x_{i,6} + a_7 \cdot x_{i,7}, \quad (29)$$

$$Y_i := Y1_i + Y2_i. \quad (30)$$

Значення відгуку за рівнянням регресії

$$Yr^T = (25.5 \quad 15.5 \quad 16.5 \quad 24.5 \quad -22.5 \quad 21.5 \quad -13.5 \quad 12.5).$$

Перевірка адекватності математичної моделі відгуку за критерієм Фішера:

- кількість значущих коефіцієнтів регресії

$$d := \sum_{i=0}^{n-1} if(Q_i = 1, 1, 0), \quad d = 5, \quad (31)$$

- залишкова дисперсія

$$S2 = 6.0,$$

- значення статистики критерію

$$F := \frac{S2}{Sy2}, \quad F = 0.98. \quad (32)$$

Квантиль  $F$  – розподілу із ступенями волі

$$f_1 := n - d, \quad f_1 = 3, \quad (33)$$

$$f_2 := n \cdot (m - 1), \quad f_2 = 16. \quad (34)$$

$$t_{\alpha} = qF(1 - \alpha, f_1, f_2), t_{\alpha} = 3.24. \quad (35)$$

Умова прийняття гіпотези про адекватність математичної моделі

$$Q = if(F \leq t_{\alpha}, 1, 0), Q = 1. \quad (36)$$

Умова прийняття гіпотези про адекватність моделі виконується (рис. 1).

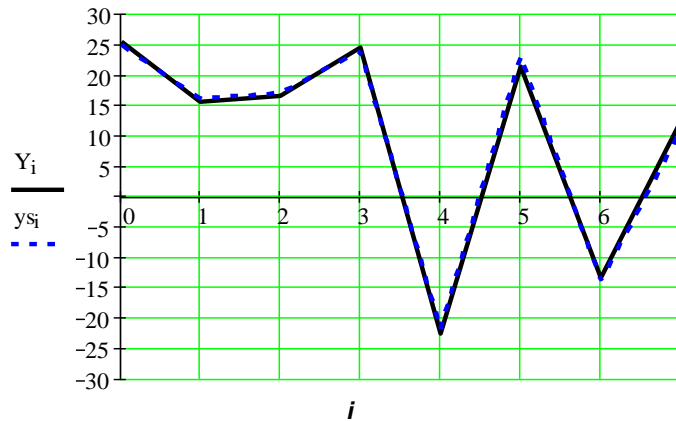


Рис. 1. Графік точок відгуку і рівняння регресії

Одержану модель можна записати у натуральних змінних, переходячи від змінних  $x_j$  до  $z_j = x_j \Delta z_j + z_{0j}$ .

**Дробовий факторний експеримент**

Якщо деякими взаємодіями можна знехтувати, то регресійна модель, яка пов'язує відгук з основними факторами, може бути одержана при меншій, ніж у ПФЕ, кількості експериментів за допомогою дробового факторного експерименту (ДФЕ). Наприклад, у випадку ПФЕ  $2^3$ , якщо взаємодіями  $x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3, x_1x_2x_3$  можна знехтувати, то можна використати 4 стовпця матриці плану, які залишилися, для визначення коефіцієнтів регресійної моделі, або знайти моделі для трьох факторів за допомогою чотирьох, а не восьми експериментів. Частина матриці ПФЕ  $2^k$ , у якій к лінійних ефектів (факторів) прирівняні до коефіцієнтів взаємодії, називається реплікою вигляду  $2^{k-r}$ .

Співвідношення, які визначають правила побудови дробових реплік ПФЕ, і які вказують, які фактори прирівняні до взаємодіям, називаються *генеруючими*. Наприклад, дробові репліки ПФЕ  $2^{3-1}$  можуть бути одержані за допомогою генеруючих співвідношень  $x_3 = x_1x_2, x_3 = -x_1x_2$ . Матриці планів, які відповідають цим дробовим реплікам, наведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Дробові репліки  $2^{3-1}$

j	$x_3 = x_1x_2$				$x_3 = -x_1x_2$			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2x_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2x_3$
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	-1	-1	1	1	2	-1	-1	-1
3	1	-1	-1	1	3	1	1	1
4	-1	1	-1	1	4	-1	-1	-1

Для розрізнення змішаних ефектів по матриці дробової репліки використовується поняття *визначального контрасту*, який характеризує комбінацію тих факторів, стовпець добутку яких складається тільки із плюсів або тільки із мінусів.

Визначальний контраст J може бути рівним +1 або -1. Наприклад, для дробових реплік

$$J = x_1x_2x_3 = +1 \text{ або } J = x_1x_2x_3 = -1.$$

Визначальний контраст дозволяє встановити систему змішування основних факторів з ефектами взаємодії. Якщо  $J = x_1x_2x_3 = +1$ , то  $x_1 = x_1^2x_2x_3 = x_2x_3$  (оскільки завжди  $x_i^2 = +1$ ), тобто оцінка  $a_1$  змішана з оцінкою  $a_{23}$ .

Якщо до ефектів взаємодії прирівнюється не один, а декілька основних факторів, для повного опису розв'язувальної здатності дробової репліки ПФЕ використовується узагальнюючий контраст. Він включає у себе частинні визначальні контрасти та їх добутки. Наприклад, при дослідженні 5 факторів можна поставити не  $2^5 = 32$  випробування, а тільки 8, якщо реалізувати дробову репліку  $2^{5-2}$ , тобто прирівняти два фактори до ефектів взаємодії. Припустимо, що вибрані варіанти змішування  $x_4 = x_1x_3, x_5 = x_1x_2x_3$  з визначальними контрастами

$$J = x_1x_3x_4 \text{ і } J = x_1x_2x_3x_5$$

відповідно. Тоді узагальнюючий визначальний контраст може бути записаний наступним чином:

$$J = x_1x_3x_4 = x_1x_2x_3x_5 = x_2x_4x_5.$$

Для того, щоб виявити з чим змішана та чи інша оцінка коефіцієнтів моделі, необхідно помножити комбінацію факторів, які відповідають їй, на узагальнюючий визначальний контраст. Наприклад, визначимо систему змішування для оцінки коефіцієнта  $a_{12}$  ефекту взаємодії  $x_1x_2$ . Маємо кількість варіантів змінних захваток

$$x_1x_2 = x_2x_3x_4 = x_3x_5 = x_1x_4x_5,$$

тобто оцінка  $a_{12}$  буде змішаною з оцінкою

$$n = \text{cols}(PA) = 6$$

коефіцієнтів  $a_{234}, a_{35}, a_{145}$ .

У загальному випадку виходить складна система змішування ефектів взаємодії. Дисперсійний аналіз був застосований для наукового дослідження факторів, що найбільше впливають на витрати па-

лива автомобілями-самоскидами та дорожніми машинами в зоні впливу (тобто – ділянки дороги, в якій змінюється режим руху транспортних засобів під час проведення дорожньо-ремонтних робіт) [10] Аналіз витрат палива методом двофакторного дискретного аналізу для ДМ і АС. Визначення впливу робочої швидкості та довжини смуги ущільнення на витрати палива дорожніми машинами відбувався за наступною методикою:

В програмі MathCad 14 задано нумерацію елементів масиву. Далі вводиться матриця кількісних показників сумарних витрат палива дорожніми машинами і присвоюються змінним m, n, N відповідно функції значення кількості смуг ущільнення, варіантів змінних захваток та загальної кількості операторів:

$$PA := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 102.22 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 70.94 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 56.42 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 48.13 & 171.80 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 42.81 & 140.63 & 232.42 & 0 & 0 & 0 \\ 39.11 & 119.66 & 194.78 & 0 & 0 & 0 \\ 36.39 & 104.66 & 168.01 & 249.31 & 0 & 0 \\ 34.32 & 93.44 & 148.08 & 217.91 & 0 & 0 \\ 32.68 & 84.76 & 132.71 & 193.78 & 268.91 & 0 \\ 31.35 & 77.85 & 120.53 & 174.70 & 241.18 & 0 \\ 30.26 & 72.23 & 110.64 & 159.27 & 218.79 & 289.87 \\ 29.35 & 67.57 & 102.47 & 146.55 & 200.38 & 264.54 \end{pmatrix}$$

Кількість довжин смуг укладання:  
 $n := \text{cols}(PA) = 6$ ,  $m := \text{rows}(PA) = 13$ .

Загальна кількість операторів:  $N := m \cdot n$

Задаються цикли для визначення номерів рядків і стовпців матриці:  $i := 1 \dots m$ ,  $j := 1 \dots n$ .

Розраховується середнє значення витрат палива в залежності факторів А та В

$$XA_i := \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n PA_{i,j} \quad (37)$$

$$XB_i := \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m PA_{i,j}. \quad (38)$$

Результати обчислення:

$$XA^T = (0 \quad 17.037 \quad 11.823 \quad 9.403 \quad 36.655)$$

$$XB^T = (42.614 \quad 71.738 \quad 93.049 \quad 87.809 \quad 71.482 \quad 42.647)$$

Розрахунок загального середнього:

$$m_x := \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n PA_{i,j}, m_x = 68.223 \quad (39)$$

Визначення кількості ступенів свободи

$$f_1 := m - 1 = 12, f_2 := n - 1 = 5,$$

$$f_3 := (m - 1) \cdot (n - 1) = 60, s2_B := \frac{s_B}{f_1}.$$

Суми квадратів відхилення по факторам А та В і відповідні дисперсії:

$$S_A := n + \sum_{i=1}^m (XA_i - m_x)^2 = 3.059 \times 10^4,$$

$$s2_A := \frac{S_A}{f_1} = 2.549 \times 10^3,$$

$$S_B := m + \sum_{i=1}^n (XB_i - m_x)^2 = 2.346 \times 10^3,$$

$$s2_B := \frac{s_B}{f_1}, s2 := \frac{S}{N-1} = 7.377 \times 10^3.$$

$$S_\epsilon := \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (PA_{i,j} - XA_i - XB_j + m_x)^2 = 3.542 \cdot 10^5.$$

Перевірка гіпотези НА: спостережувальне значення критеріальної статистики по фактору А:

$$F_A := \frac{s2_A^2}{s2_\epsilon^2} = 0.186.$$

Критичне значення критерію (квантіль порядку 1- $\alpha$  F-розподілу Фішера з  $f_1$  та  $f_2$  ступенями свободи,  $\alpha := 0.05$ ):  $t_A := qF(1 - \alpha, f_1, f_2) = 1.917$ .

Перевірка гіпотези НА про рівність математичних очікувань за фактором А:  $Q_A := if(F_A \leq t_A)$ .

$$\text{Коефіцієнт детермінації } R2_A := \frac{s2_A}{s2} = 0.346.$$

Перевірка гіпотези НВ: спостережене значення критеріальної статистики по фактору В:

$$F_B := \frac{s2_B}{s2_\epsilon} = 0.033.$$

Критичне значення критерію (квантіль порядку 1- $\alpha$  F-розподілу Фішера з  $f_2, f_3$  ступенями свободи

$$t_B := qF(1 - \alpha, f_2, f_3) = 2.368.$$

Перевірка гіпотези НВ про рівність математичних очікувань за фактором В:  $Q_B := if(F_B \leq t_B)$ .

$$\text{Коефіцієнт детермінації: } R2_B := \frac{s2_B}{s2} = 0.027.$$

Оцінка параметрів  $\mu$  та  $\sigma^2$  нормального розподілу випадкових залишків:

$$\mu := m_x = 68.223, \quad \sigma^2 = \frac{s2_\epsilon}{f_1 \cdot f_3} = 8.199.$$

Визначення впливу щільності асфальтобетону та довжини змінної захватки на витрати палива АС:

$$PC := \begin{pmatrix} 11.43 & 28.75 & 28.75 & 43.13 & 43.13 & 57.14 \\ 11.43 & 28.75 & 28.75 & 43.13 & 43.13 & 57.14 \\ 11.43 & 28.75 & 28.75 & 43.13 & 43.13 & 57.14 \\ 11.43 & 28.75 & 43.13 & 43.13 & 43.13 & 57.50 \\ 11.43 & 28.75 & 43.13 & 43.13 & 43.13 & 57.50 \end{pmatrix}$$

Кількість варіантів щільності асфальтобетону:

$$m := \text{rows}(PC) = 6.$$

Кількість варіантів довжини змінної захватки

$$n := \text{cols}(PC) = 6, \quad N := m \cdot n.$$

Середнє значення витрат палива в залежності факторів А та В:

$$XA_j := \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n PC_{i,j}, \quad XB_j := \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m PC_{i,j}.$$

$$XA^T = (35.388 \quad 35.388 \quad 35.388),$$

$$XB^T = (11.43 \quad 28.75 \quad 35.94 \quad 43.13 \quad 45.465 \quad 57.26),$$

$$m_x := \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n PC_{i,j} = 36.996.$$

Кількість ступенів свободи

$$f_1 := m - 1 = 5, \quad f_2 := n - 1 = 5,$$

$$f_3 := (m - 1) \cdot (n - 1) = 25.$$

Суми квадратів відхилення по факторам А та В і відповідні дисперсії:

$$S_A := n + \sum_{i=1}^m (XA_i - m_x)^2 = 25.235,$$

$$s_{2A} := \frac{s_A}{f_1} = 5,047, s_{2B} := \frac{s_B}{f_1} = 249.742,$$

$$S_B := m + \sum_{i=1}^n (XB_i - m_x)^2 = 1.249 \times 10^3,$$

$$S_\varepsilon := 358.506), s_{2\varepsilon} := \frac{s_\varepsilon}{f_3} = 14.34),$$

$$S := \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (PC_{i,j} - m_x)^2 = 7.93 \times 10^3,$$

$$s_2 := \frac{s}{N-1} = 226.577.$$

Перевірка гіпотези НА: спостережувальне значення критеріальної статистики по фактору А:

$$F_A := \frac{s_{2A}}{s_{2\varepsilon}} = 0.352.$$

Критичне значення критерію

$$t_A := qF(1 - \alpha, f_1, f_3) = 2.603.$$

Перевірка гіпотези НА про рівність математичних сподівань за фактором А:

$$Q_A := if(F_A \leq t_A).$$

Коефіцієнт детермінації

$$R_{2A} := \frac{s_{2A}}{s_2} = 0.022$$

Перевірка гіпотези НВ: спостережене значення критеріальної статистики по фактору В:

$$F_B := \frac{s_{2B}}{s_{2\varepsilon}} = 17.415.$$

Критичне значення критерію

$$t_B := qF(1 - \alpha, f_2, f_3) = 2.603.$$

Перевірка гіпотези НВ про рівність математичних очікувань за фактором В:

$$Q_B := if(F_B \leq t_B).$$

Коефіцієнт детермінації

$$R_{2B} := \frac{s_{2B}}{s_2} = 1.102.$$

Оцінка параметрів а та  $\sigma^2$  нормального розподілу випадкових залишків:

$$m_x = 68.223; \quad \sigma^2 := \frac{s_{2\varepsilon}}{f_1 \cdot f_3} = 0.115.$$

Проведений дисперсійний аналіз показав, що гіпотеза А та гіпотеза В про рівність математичних очікувань витрат палива АС в залежності від щільності асфальтобетону (фактор А) - приймається та довжини ЗЗ (фактор В) – приймається. Це означає, що обидва фактори мають вплив на витрати палива автомобілями самоскидами. Щодо ДМ – обидва фактори – швидкість руху та довжина ЗЗ (змінної захватки) впливають на витрати палива.

## Висновки

Найбільш ефективними дробовими репліками від ПФЕ є репліки, у яких лінійні ефекти змішані із взаємодіями найвищого порядку.

Розрізняють регулярні і нерегулярні дробові репліки. *Регулярні репліки* утворюються із ПФЕ діленням на число частин, кратне двом. Репліки типу 4/4, 5/8 і т.д. називаються *нерегулярними*. Дробові репліки дозволяють суттєво скоротити число факторів і експериментів для моделювання процесу. Особливо ефективно їх застосування при плануванні експериментів для знаходження оптимуму відгуку.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Організація наукових досліджень: навчальний посібник / В.М. Кислий. - Суми: Університетська книга, 2011. - 224 с.
2. Планування і обробка даних наукового експерименту / В.В. Полтавець. - Донецьк: ДВНЗ ДонНТУ, 2008 — 52 с.
3. Методологія наукових досліджень технологічних процесів. /П.Білей, М.Адамовський, Я. Ханик, Н. Довга, Л. Сорока/ - Львів: Видав. НУ "Львівська політехніка", 2003. - 352 с.
4. Засименко В.М. Основи теорії планування експерименту. Навч. посібник. - Львів: Видав. ДУ «ЛП», - 2000. - 205 с.
5. Стеченко Д.М., Чмир О.С. Методологія наукових досліджень. Підручник. - К.: Знання, 2005. - 309 с.
6. Аністратенко В.О., Федоров В.Г. Математичне планування експерименту в АПК. - К.: Вища школа, 1993.- 375 с.
7. Основи наукових досліджень / В.С. Марцин, Н.Г. Міценко, О.А. Даниленко та ін. - Львів: Ромус-Поліграф, 2002.- 128 с.
8. Шенк Х. Теорія інженерного експерименту. М., 1972- 382 с.
9. Теорія планування експериментів: – Київ : КП ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 86 с. Дехтяр М. М. Інформаційні моделі та метод управління енергоефективністю дорожньо-ремонтних робіт : дис. канд. техн. наук : 05.13.06 / Дехтяр Марина Михайлівна – м. Київ, 2021. – 208 с.

Received (Надійшла) 22.08.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.10.2022

## Computer and information technologies for planning experiments

A. N. Al-Ammori, M. Dekhtyar, H. I. S. Abdusalam

**Abstract.** Solving tasks of analysis and research of economic, production and management processes in transport is based on the use of the latest computer technologies (mathematical and statistical packages, electronic spreadsheets, etc.). Recently, there has been an increased interest in statistical analysis methods. In this work, the mathematical package Mathcad was chosen as a tool for probabilistic and statistical calculations. The choice of Mathcad is due to the fact that it is a powerful and universal computer mathematics system designed for mathematical calculations. The simplicity of the Mathcad interface, a wide set of tools for computer implementation of numerical methods for solving mathematical problems, high-quality computer graphics, the ability to record formulas in their natural form have made it one of the popular tools for mathematical calculations. An important component of Mathcad is the programming system, which has a language close to traditional professional programming languages, which significantly expands Mathcad's computing capabilities. The advantage of Mathcad is its openness to adding new algorithms, user functions and programs. The work combines both theoretical and computer technologies of calculations from the numerical implementation of mathematical models of the proposed tasks. This gives an opportunity to deepen the knowledge of the theory of statistical analysis, to develop skills in solving problems according to the given computer algorithms, to expand the idea of the areas of application of statistical analysis methods for solving practical problems in the field of economics, production and management.

**Keywords:** statistical method, complete experiment, information technologies, mathematical model of experiment planning.



К. О. Вадурін, А. Л. Перекрест, М. І. Гученко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна

## ПРОТОТИП КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ФІЗИЧНОГО СТАНУ ОПЕРАТОРА ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

**Анотація.** Телефони, персональні комп'ютери, машини, потяги, літаки у всіх цих пристроях є величезна кількість датчиків, що дозволяють визначити поточний стан майже кожної системи апарату. Але зовсім не досліджують психоемоційний та фізичний стан операторів під час керування такою комплексною технікою. За статистикою, більше половини авіакатастроф стається через людський фактор. Щоб зменшити кількість авіакатастроф пов'язаних з погіршенням стану оператора літального апарату пропонується використовувати мобільний біомедичний комплекс з програмною та апаратною частинами. Розроблюваний комплекс має знімати основні біологічні показники оператора у реальному часі, зберігати та оброблювати їх, щоб за цими даними було можна давати поради операторові задля покращення його стану. Апаратна частина включає наступні блоки обробки даних з датчиків: кардіограф; чотири міографи; пульсоксиметр; температури та вологості; визначення опору шкіри. Дані від блоків обробників даних збираються мікроконтролером-обробником, який може додатково перетворювати дані у адекватні фізичні величини. Мікроконтролер-обробник обмінюється даними з мікроконтролером-сервером, що призначений для буферизації та виведення даних на пристрій користувача чи у хмарні WEB-сервіси. Програмна частина включає програми нижнього рівня для збирання даних вимірів, їх обробку, формування у пакети, обмін пакетами між мікроконтролерами та вивід даних на WEB-сервіси, а також Backend WEB-сторінок користувачького інтерфейсу. Програмування верхнього рівня включає розробку WEB-сторінок де відображається поточна інформація про стан досліджуваного користувача. На даний момент створена модель біомедичного комплексу на базі платформ Arduino UNO та NodeMCU, яка може вимірювати опір шкіри, вологість та температуру дихання, а також передавати їх клієнтам що знаходяться в локальній мережі. У майбутньому планується: розробка системи збереження даних та їх надсилання під'єднаним користувачам; удосконалення користувачького інтерфейсу та реалізація функціоналу швидкого перенастроювання моніторингових функцій комплексу; створення системи обробки даних на основі інформаційно-аналітичних інструментів підтримки прийняття рішень, щоб формувати індивідуальні рекомендації щодо покращення фізичного стану оператора.

**Ключові слова:** біомедичний комплекс, WEB-сервер, IoT пристрій, кібернетична система, Arduino, ESP, програмне рішення, апаратне рішення.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Наразі у світі наявна велетенська кількість апаратів керування якими здійснюється людьми-операторами. Розробники таких апаратів передбачають різноманітні стани, в яких можуть знаходитися їх творіння, встановлюють найрізноманітніші датчики для моніторингу стану критичних систем та положення апарату у просторі. Фізичний стан операторів таких складних апаратів вимірювати, на жаль, не прийнято. За статистикою більше 50 % авіакатастроф трапляються через людський фактор.

Інженери постійно намагаються зменшити вплив людського фактору удосконалюючи керуючі та безпекові вузли літальних апаратів.

Ми ж пропонуємо здійснювати моніторинг та чинити вплив на джерело людського фактору – оператора літального апарата.

Щоб спробувати скоригувати вплив фізичного стану оператора літального апарату на вчинення ним помилок доцільно створити біомедичний комплекс для зняття поточних біологічних параметрів оператора та формування рекомендацій для його покращення, якщо є необхідність.

**Мета та задачі досліджень.** Метою цієї роботи є створення цілісної IoT-базованої інформаційної технології, що дозволяє знімати, акумулювати, оброблювати фізичні показники оператора літального апарата та у реальному часі формувати рекомендації для їх покращення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз існуючих програмно-апаратних рішень для моніторингу стану оператора літального апарату;
- розробити структуру апаратної частини для реалізації біомедичного комплексу;
- створити прототип біомедичного комплексу, достатній для реалізації програмної частини комплексу;
- розробити програми для роботи апаратної частини та візуалізації даних.

**Об'єкт та предмет досліджень.** Об'єктом дослідження є процес зняття, обробки та акумулювання біологічних показників стану оператора літального апарата.

Предметом дослідження є інформаційна технологія моніторингу стану оператора, що керує літальним апаратом.

**Методи дослідження.** Теоретичні: досліджено можливості обміну даними між двома мікроконтролерами, що знаходяться в одній системі та зовнішніми приймаючими пристроями.

Експериментальні дослідження полягають у тому що: розроблена структурна схема біомедичного комплексу для моніторингу стану оператора літального апарата; створено прототип, що володіє основним функціоналом запропонованої структури; реалізована програмна частина розробки для базової обробки та візуалізації даних на пристрої користувача; опротестовано прототип біомедичного комплексу з

використанням існуючої IoT-інфраструктури та у режимі створення власної інфраструктури.

**Наукова новизна роботи.** Наукова новизна роботи полягає в наступному:

- удосконалено інформаційну систему взаємодії мікроконтролерів Atmega328p та ESP8266, яка, на відміну від інших, базується на основі передачі даних по UART у вигляді посилки, що дублюються у інтерфейс COM-порту через мікросхему CH340, що дозволяє як отримувати дані на стаціонарному ПК під'єднаному дротом, так і на другому мікроконтролері системи;

- удосконалено метод побудови медичного обладнання розумної лікарні використовуючи прийоми IoT, який, на відміну від існуючих, передбачає використання для обробки інформації декілька енергозберігаючих мікроконтролерів, що має дозволити збільшити час роботи портативних біомедичних пристроїв за умов використання акумуляторів такої ж ємності;

- уперше розроблено метод збору та структурування даних про операторів літальних апаратів під час тренувальних польотів, для формування баз даних з трендами основних біологічних показників різних користувачів у подібних симульованих ситуаціях. Метод, на відміну від інших, передбачає зберігання даних в окремо створену базу даних з прив'язкою часових відрізків моніторингу до відео потоку зйомки тестового польоту, що має дозволити краще пов'язати дії з біологічно-психологічним станом;

- уперше розроблено структуру апаратної частини інформаційної системи збирання біологічних параметрів на основі взаємодії Arduino UNO та NodeMCU, яка, на відміну від інших, передбачає збирання та первинну обробку даних одним мікроконтролером та фінальну обробку і візуалізацію даних іншим мікроконтролером, що повинно забезпечити рівномірний розподіл навантаженості між мікроконтролерами та зменшити загальний час необхідний на повний цикл обробки даних;

- удосконалено графічний WEB-інтерфейс для індикації знятих біологічних показників, який, на відміну від інших може здійснювати паралельне асинхронне оновлення точок графіків, що має підвищити якість візуалізації контенту.

#### **Практична цінність отриманих результатів.**

Практична цінність отриманих результатів полягає в: розробці структури біомедичного комплексу та реалізації його прототипу на базі платформ Arduino UNO та NodeMCU; створенні програмного забезпечення нижнього рівня для збирання даних про біологічні показники, їх обробці, упаковуванню у посилки, прийнятті посилки, виокремлення з них даних, візуалізації даних на WEB-сторінці запущеного локального серверу; створенню універсальної програмної основи для складних пристроїв IoT на базі Atmega328p та ESP8266.

#### **Аналіз подібних рішень**

Питання розробки IoT пристроїв для медичного використання розглядається великою кількістю наукових команд з різними підходами. Дослідникам було проведено дослідження з зняття електрока-

рдіограми за допомогою модуля BIFalino (r)evolution та надсиланням їх використовуючи Bluetooth на персональний ПК для подальшої обробки, що описано у [1]. Проаналізовано можливості використання периферійних обчислень та штучного інтелекту в інтелектуальних біомедичних датчиках наступного покоління, що розглянуто в [2]. Розроблено моніторингову систему збору даних частот серцевих скорочень футболістів у [3].

Ми ж пропонуємо здійснювати моніторинг операторів літальних апаратів під час тренувальних польотів. Оператори літальних апаратів знаходяться переважно у зафіксованому та малорухливому стані та на їх біологічні параметри значно впливатимуть, крім переважань, психологічні та емоційні чинники. Щоб отримати, обробити, структурувати біологічні показники оператора літального апарату, прив'язати отримані тренди до того чи іншого психологічного стану та надати рекомендації щодо можливого покращення стану оператора можливо використати існуючу IoT-інфраструктуру з імплементацією наших програмно-апаратних рішень.

#### **Розробка структурної схеми біомедичного комплексу**

Наразі, наша команда працює над створенням універсальної програмної платформи для реалізації комплексної системи інтернету речей. Розроблювана платформа базується на взаємодії набору електронних пристроїв: мікроконтролера-обробника; мікроконтролера-сервера; набору кінцевих керуючих пристроїв. На основі цієї платформи відбувається розробка таких IoT проектів, як: «Стенд для випробування іграшкових автомобілів на базі стрічкового конвеєра та ЧПК верстата», «Мобільний пристрій моніторингу стану повітря за маршрутом руху екологічного транспорту». Представлений в цій статті біомедичний комплекс також базується на основі розроблюваної зв'язки мікроконтролерів.

Для побудови апаратної частини пристрою для моніторингу стану оператора літального апарата, спершу, було створено його структурну схему.

До структурної схеми ввійшли блоки, що легко піддаються мініатюризації, щоб у подальшому можна було помістити апаратну частину комплексу в невеличкий корпус для вільного носіння досліджуваним оператором.

У ролі мікроконтролера-обробника виступає Atmega328p, що входить до складу платформи Arduino UNO. Цей мікроконтролер має оброблювати дані з блоків моніторингу, формувати їх у повідомлення та надсилати пакети даних у послідовний порт UART. Оскільки дані, що будуть надіслані через UART до мікроконтролера-сервера дублюються мікросхемою CH340 у інтерфейс COM-порту, при приєднанні до ПК, можливо реалізувати функцію переходу у стаціонарний режим моніторингу. Стаціонарний режим передбачає живлення системи від ПК та відмикання функцій виведення даних за допомогою мікроконтролера-сервера.

Для реалізації функцій мікроконтролера-сервера було обрано чіп ESP8266 у складі платформи

NodeMCU. Дана платформа отримує дані від Atmega328p, оброблює їх та виводить на встановлений сервер. Сервер являє собою набір WEB-сторінок у які виводяться дані. NodeMCU може працювати як станція, підключаючись до локальних точок доступу, чи створювати власну мережу, що корисно коли поблизу немає вільних чи знайомих Wi-Fi-мереж. Також серед слід відзначити можливість передавати дані ESP8266 до хмарних сховищ чи ресурсів, де надіслані дані можуть зберігатися та піддаватися додатковій обробці та аналізу.

За допомогою блоку індикації планується візуалізувати процеси зміни режимів роботи та розрахунковий час роботи акумулятора.

Блок зміни режимів роботи включатиме набір перемичок та вузлів узгодження рівнів сигналів, для швидкого переходу в режим програмування Atmega328p чи ESP8266, чи для обміну даними по UART.

До блоку кардіографа входить AD8232 на платі від SparkFun, що має дозволити отримати приблизний вигляд кардіограми досліджуваного оператора.

Блок пульсоксиметру включає два вузли: MAX30102 – інтегральний датчик пульсу та насиченості крові киснем; Pulse Sensor – модуль для калібрування отриманих значень серцевих скорочень з MAX30102.

Блок визначення опору шкіри фактично реалізований на базі платформи Arduino UNO, як цифровий оміметр.

Блоки міографів являють собою EMG модулі підсилювачів, що мають фіксувати зміни електропотенціалів на м'язях досліджуваного оператора.

Блок виміру температури та вологості дихання на основі DHT11 дозволить, у подальшому, спростувати чи підтвердити теорію про зміну вологості та температури дихання залежно від фізичного стану досліджуваного суб'єкта.

Блок цифрової обробки звуків подиху містить два модулі: MAX9814, що дозволяє записувати звуки подиху; KY-037, що дозволяє визначати тривалість вдиху-видиху та їх періодичність.

Електроди та датчики, необхідні для зняття вимірів з тіла досліджуваного суб'єкта, мають розміщуватися поза корпусом пристрою та під'єднуватися через роз'єм. Деякі з описаних блоків обробки сигналів можуть потребувати безпосереднього розміщення на тілі досліджуваного суб'єкта.

Акумулятор необхідний для забезпечення мобільності пристрою та незалежності від побутової мережі. Блок перетворення напруги акумулятора необхідний лише для прототипів пристрою на фінальних етапах розробки, на даній стадії живлення здійснюється від USB-роз'ємів ПК.

Для кінцевих етапів проектування передбачено можливість оновлення прошивок на Atmega328p та ESP8266 за допомогою ПК. Також ПК має стати основою для створення стаціонарної станції моніторингу, яка акумулюватиме дані напряму з мікроконтролера-обробника та структуруватиме їх формуючи базу даних контрольних вимірів для кожного досліджуваного суб'єкта.

При переміщенні суб'єкта в межах однієї бездротової мережі, під час дослідження, можливе підключення пристрою до Wi-Fi точки доступу для віддачі даних у хмарний сервіс чи портативний ПК-дослідника.

Структурну схему розробленого біомедичного комплексу надано на рис. 1.

### Синтез схеми електричних з'єднань та фізична побудова прототипу

Схема електричних з'єднань та прототип апаратної частини інформаційно-технології розроблені виходячи з кількості та типу наявних модулів. На момент побудови першого прототипу у наявності було лише декілька модулів та платформ: Arduino UNO; NodeMCU; AD8232; DHT11; резистори декількох номіналів; макетна плата; контактні дроти.

Схема електричних з'єднань виконана за допомогою програми Fritzing, а моделі модулів NodeMCU, AD8232, DHT11 знайдені у відкритих джерелах. Як видно з схеми представленої на рис. 2, NodeMCU та Arduino UNO підключені за лініями RX та TX, для обміну даними по UART, що також треба враховувати при заливці прошивки на кожен з платформ.

Використання в схемі двох мікроконтролерних платформ дозволяє розподілити між ними задачі інформаційної обробки знятих даних. До аналогових та цифрових виводів Arduino UNO підключаються або модулі, або обвіска для здійснення розрахунків використовуючи вбудовані функціональні можливості Atmega328p. Робота ж з серверної частини та акумулювання даних здійснюється переважно NodeMCU, оскільки вона має більший об'єм пам'яті та власну файлову систему.

Побудований прототип апаратної частини інформаційної технології отримання, обробки та візуалізації біологічних показників наведено на рис. 3.

На момент публікації статті його живлення відбувається від ПК, а отже, й дані дублюються в інтерфейс послідовного порту, хоча основна візуалізація оброблених показників здійснюється через мережу сформовану локальною точкою доступу, у вигляді WEB-інтерфейсу.

Кінцевий датчик блоку визначення опору шкіри представлений резистором, замість якого має бути підключена ділянка шкіри опір якої вимірюється. Принцип вимірювання опору шкіри базується на основі ділення напруги, причому опір невідомого резистора визначається на основі падіння напруги на відомому резисторі. У змодельованій схемі максимально можливий вимірюваний опір становить:  $(272 \text{ Ом} - \text{опір відомого резистора дільника}) \times (4,995 \text{ В} - \text{напруга на шкірі по відношенню до землі}) / \{(5 \text{ В} - \text{напруга на виводі живлення Arduino UNO}) - (4,995 \text{ В} - \text{напруга на шкірі})\} = 278256 \text{ Ом}$ .

Виміри температури, вологості подиху та їх відношення здійснюються за допомогою підключеного модуля DHT11. Струм живлення цього модуля становить до 2,5 мА (на етапі перетворення даних), діапазон виміру вологості 20 ... 80 % з похибкою 5 %, діапазон виміру температури 0 ... 50 % з точністю 2 %, частота формування даних 1 Гц.

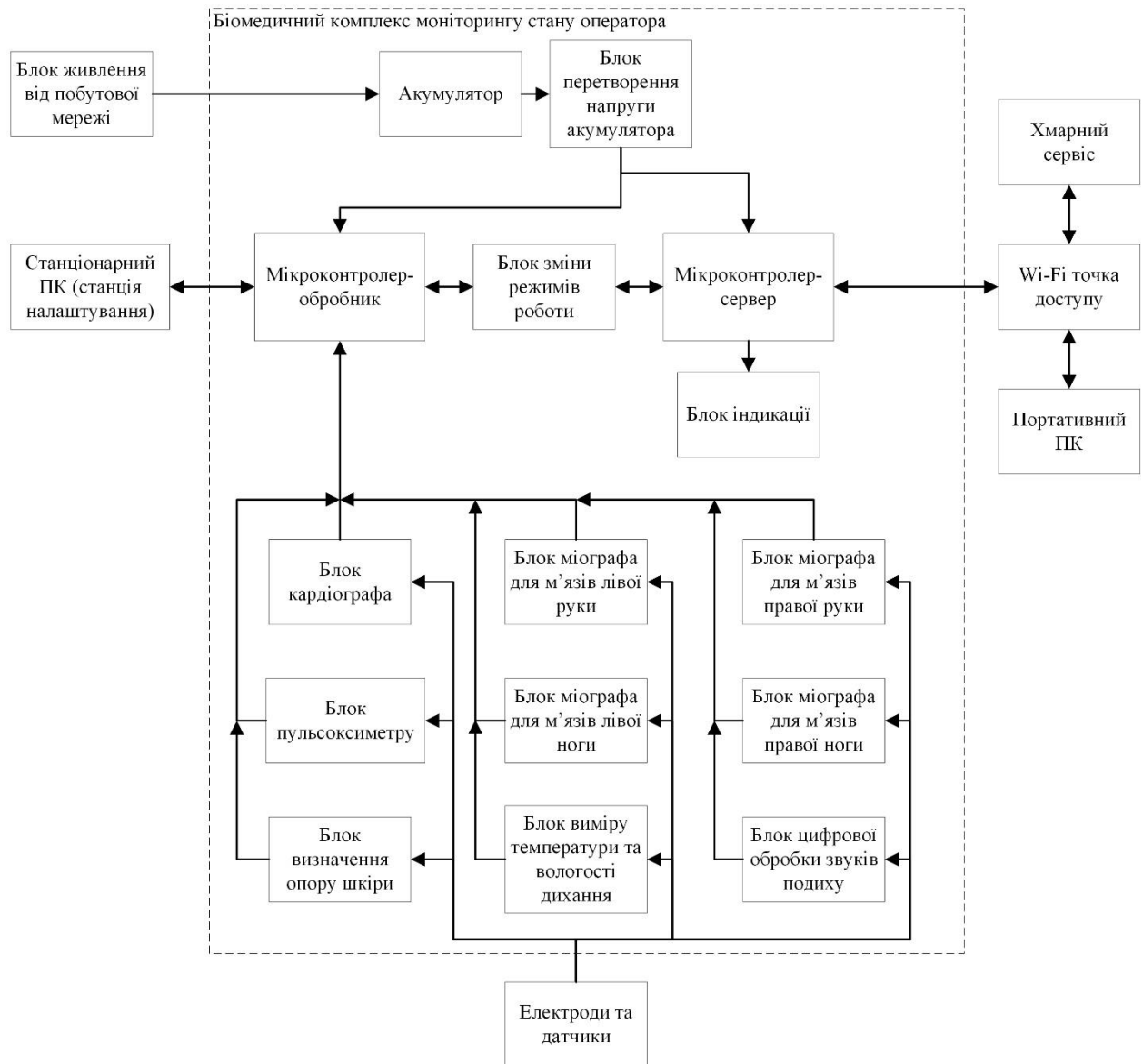


Рис. 1. Структурна схема біомедичного комплексу для моніторингу стану оператора

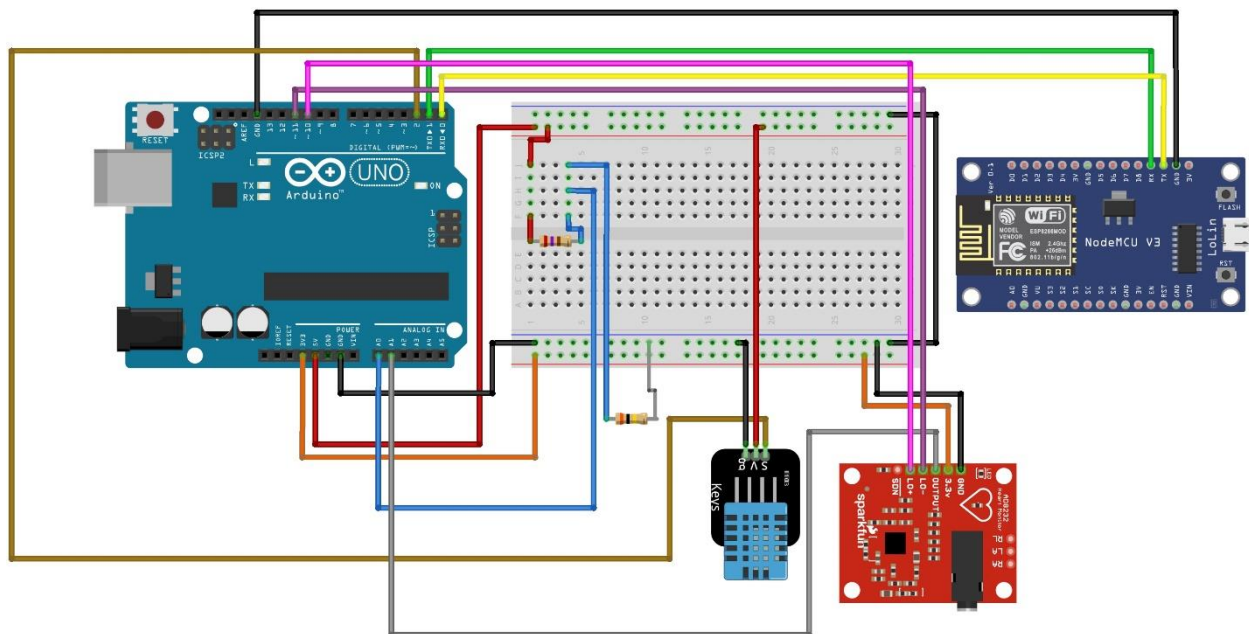


Рис. 2. Схема апаратної частини інформаційної технології у Fritzing

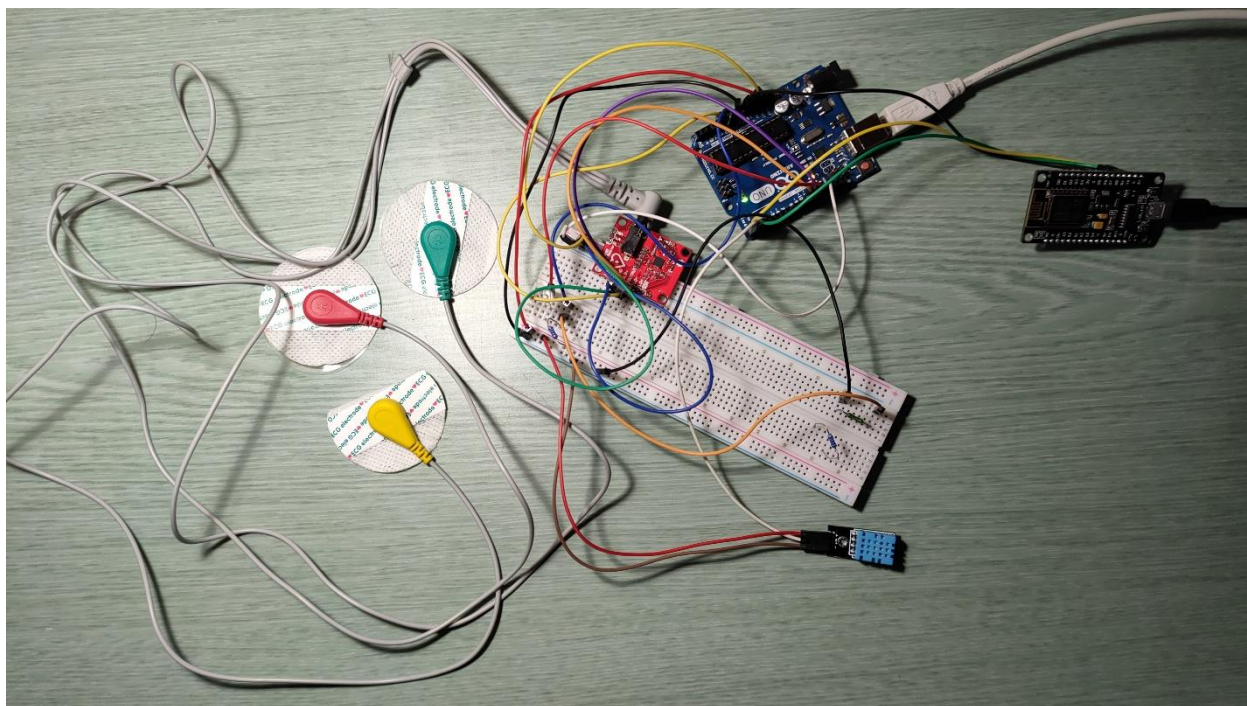


Рис. 3. Побудований прототип апаратної частини

AD8232 являє собою модуль електрокардіографа. Живлення даного модуля здійснюється від 3,3 В платформи Arduino UNO. Цифрові контакти LO- та LO+ підключаються до виводів 11 та 10 Arduino UNO, відповідно. Модуль дозволяє здійснити підсилення слабких біосигналів та здійснити фільтрацію шумів в умовах сильних електромагнітних полів. До складу AD8232 входять двополосний фільтр високих частот та некомутований операційний підсилювач, що дозволяє реалізувати технологію багатополосної низькочастотної фільтрації для видалення різних шумів.

Датчик AD8232 працює на основі методу двополосних відведень, за якого відбувається фіксація різних потенціалів між двома точками електричного поля (цифрові електроди). Ці дані можна використовувати для відслідковування ритмів серця при навантаженнях чи заняттях спортом.

### Синтез алгоритму функціонування мікроконтролера-обробника

Хоча на початку була представлена повна структура інформаційної технології, якою вона може бути на кінцевій стадії розробки, для створення підґрунтя для її реалізації побудовано алгоритми функціонування та програми роботи мікроконтролерів з урахуванням встановлення наявних модулів, щоб перевірити основну працездатність апаратної частини. Створення такого програмного та апаратного скелету інформаційної системи дозволить швидко налаштувати інформаційну технологію на роботу з усіма запланованими модулями, коли вони будуть доступні.

Побудовані функціональні алгоритми організовані на основі функцій прописаних у Arduino IDE, щоб створити умовно-блочну структуру для швидкого орієнтування за розробленим вихідним кодом.

Алгоритм функціонування програми мікроконтролера-обробника починається ініціалізації бібліотек: GParser – необхідної для обробки даних сформованих у послідовному порті; DHT – дозволяє отримати дані з датчика температури та вологості, а також вирахувати їх відношення. Далі здійснюється ініціалізація глобальних змінних, необхідних для обміну даними між функціональними процесами.

Програма МК обробника передбачає реалізацію таких функцій:

- «Відправка повідомлення» – формує String-рядок з біологічними показниками розділеними «,» та звершенням у вигляді «;».
- «Зняття параметрів подиху» – з датчика DHT11 зчитуються параметри вологості температури та розраховується тепловий індекс.
- «Читання з UART» – здійснює перевірку наявності даних у буфері послідовного порту, якщо дані є, то здійснюється їх прийняття, відкидання зайвих символів, розбиття на підрядки та виокремлення даних з підрядків. За значенням, що приходить разом з кодом 100 вмикається чи вимикається світлодіод, якщо ж приходить значення 101 то активується функція «Відправка повідомлення».
- «Визначення опору шкіри» – знімається значення з входу A0, та відбувається розрахунок опору шкіри.
- «Побудова кардіограми» – перевіряється наявність високого сигналу на цифрових виводах AD8232, якщо на них низький рівень сигналу, то відбувається читання з входу A1 та отримане значення записується у глобальну змінну.
- «Налаштування» – передбачає виконання одноразових дій. Встановлюється швидкість обміну даними по послідовному порту на рівні 115200 бод, налаштовуються режими роботи виводів Arduino

UNO та відбувається запуск зчитування даних з DHT11.

• «Основний цикл» – функція, яка виконується безперервно після налаштування, до вимкнення живлення чи переходу у режим енергозбереження.

Послідовно запускає «Читання з UART», «Визначення опору шкіри», «Побудова кардіограми», «Зняття параметрів подиху».

Схему алгоритму функціонування програми мікроконтролера-обробника наведено на рис. 4.

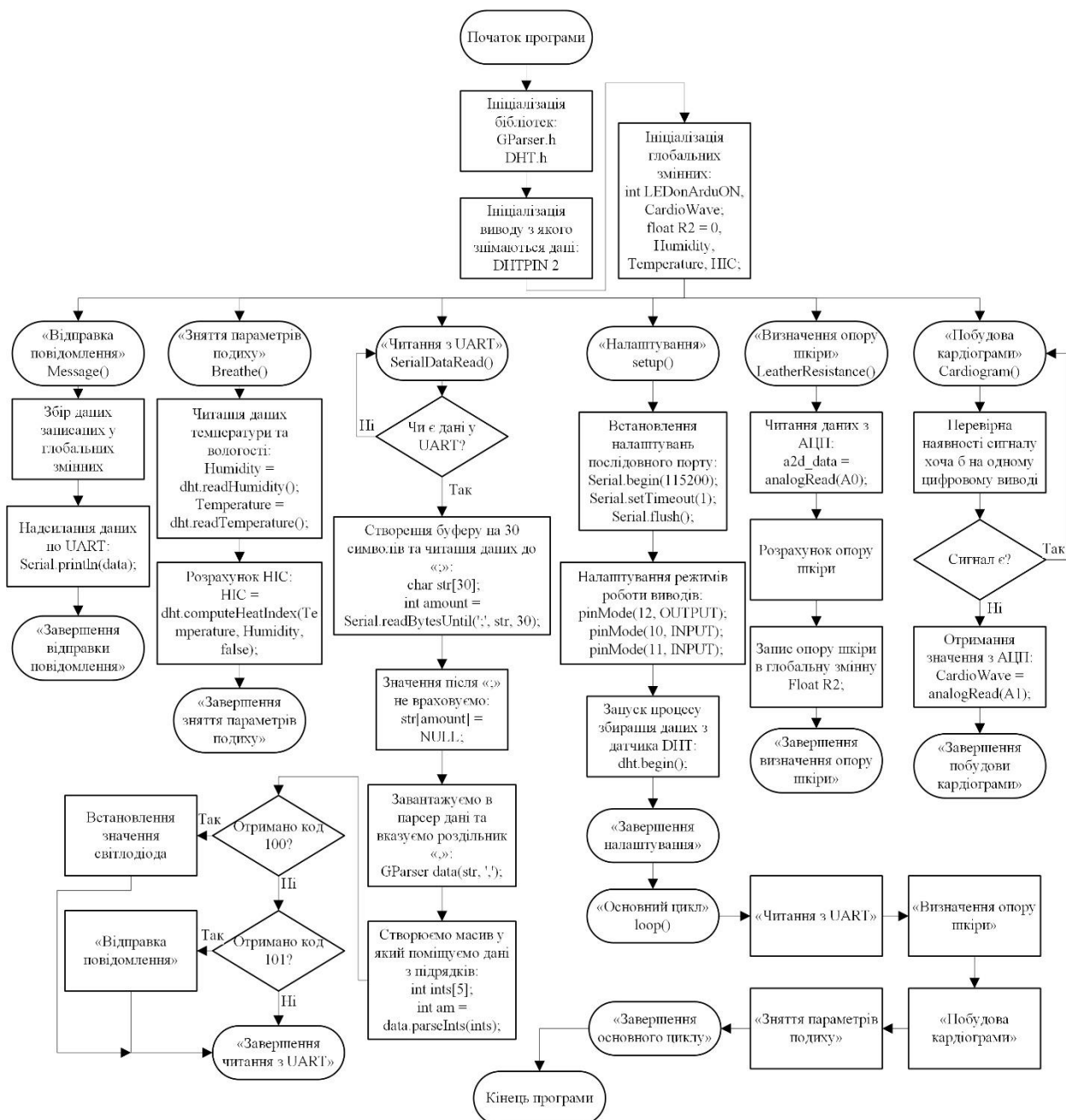


Рис. 4. Алгоритм функціонування мікроконтролера-обробника

### Синтез алгоритму функціонування мікроконтролера-сервера

Алгоритм функціонування програми мікроконтролера-сервера за методикою побудови подібний до алгоритму мікроконтролера-обробника.

Початок програми передбачає завантаження набору бібліотек: ESP8266WiFi.h – для використання Wi-Fi-функцій ESP8266; ESPAsyncTCP.h та ESPAsyncWebServer.h – для забезпечення асинхронної передачі даних в інтерфейс користувача наявний

на WEB-сторінці; FS.h – активація файлової системи SPIFFS, куди можна завантажити ресурси WEB-серверу; GParser.h – забезпечує обмін по UART.

У глобальних змінних ініціалізовані змінні необхідні для передачі даних з циклу отримання повідомлення у інтерфейс WEB-сторінки.

Далі встановлюються параметри мережі сформованої локальною точкою Wi-Fi та визначається порт на якому буде запусканий WEB-сервер.

Цей алгоритм передбачає наявність наступних функцій:







• Наразі на ринку представлено модифікації платформ Arduino з інтегрованими чіпами ESP8266 для реалізації інтернет технологій. У подальшому буде розглянуто можливість збирання подальших прототипів на основі таких платформ факторів UNO чи Mega, щоб розширити кількість виводів до яких можна під'єднати оброблювальні блоки.

• Наразі відбувається розробка функції для акумуляції знятих біологічних показників у текстові файли. У подальшому планується автоматизувати систему відвантаження текстових файлів у базу даних розташовану у хмарному сховищі.

• На основі створеної бази даних біологічних параметрів операторів різних апаратів, планується

реалізувати інформаційну технологію підтримки прийняття рішень, що буде базуватися на індивідуально знятих контрольних показниках та сукупних статистичних узагальненнях. Така система має тісно взаємодіяти з прогностичною моделлю авіасимуляторів.

• Розроблювану інформаційну технологію планується пристосувати до потреб інших галузей, у тому числі для використання у професійному спорті. Для цього планується розробити спеціалізовану конструкцію апаратної частини з мінімізацією ваги та помітності та підвищеною надійністю. Також передбачається пошук можливості розробки мініатюрних бездротових датчиків.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rodríguez-Jorge, R., De León-Damas, I., Bila, J., & Škvor, J. (2021). Internet of things-assisted architecture for QRS complex detection in real time. *Internet of Things*, 14, 100395. doi: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100395>
2. De Giovanni, E., Forooghifar, F., Surrel, G., Teijeiro, T., Peon, M., Aminifar, A., & Atienza Alonso, D. (2022). Intelligent Edge Biomedical Sensors in the Internet of Things (IoT) Era. In *Emerging Computing: From Devices to Systems* (pp. 407-433). Springer, Singapore. doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-7487-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7487-7_13)
3. Mora, H., Gil, D., Munoz Terol, R., Azorin, J., & Szymanski, J. (2017). An IoT-based computational framework for healthcare monitoring in mobile environments. *Sensors*, 17(10), 2302. doi: <https://doi.org/10.3390/s17102302>
4. ESP32/ESP8266 Plot Sensor Readings in Real Time Charts | Random Nerd Tutorials. (n.d.). Random Nerd Tutorials. <https://randomnerdtutorials.com/esp32-esp8266-plot-chart-web-server/>
5. Olkhova, Y., Guchenko, M. (2015). Creation of a Local Model of a Neuron-Controlled Process Network. *Electromechanical Systems, Modeling and Optimization Methods* (p. 318). KrNU, Ukraine. URL: [http://www.kdu.edu.ua/statti/Tezi/Tezi\\_EES\\_%20pdf/318.PDF](http://www.kdu.edu.ua/statti/Tezi/Tezi_EES_%20pdf/318.PDF)
6. Guchenko, M., Kostenko P., Slavko O., Sokhin N. (2015). A Formal Model of Information Technology for Improving the Quality of Service of Data Flows Based on a Local Model of The Controlled Process. *Problems of informatization and management*, 3 (51), KrNU, Ukraine. URL: <https://jrnل.nau.edu.ua/index.php/PIU/article/view/10305/13567>
7. Zagirnyak, M., Perekrest, A., Ogar, V., Chebotarova, Y., & Mur, O. (2021). Segmentation of heat energy consumers based on data on daily power consumption. *Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk*, (2), 89-96. URL: [http://www.nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2021/2/02\\_2021\\_Zagirnyak.pdf](http://www.nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2021/2/02_2021_Zagirnyak.pdf)
8. Perekrest, A., Chenchevoi, V., Chencheva, O., Kovalenko, A., Kushch-Zhyrko, M., Kalizhanova, A., & Amirgaliyev, Y. (2022). Prediction Model of Public Houses' heating Systems: a Comparison of Support Vector Machine Method and Random Forest Method. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 12(3), 34-39. URL: <https://ph.pollub.pl/index.php/iapgos/article/view/3032/2723>

Received (Надійшла) 29.08.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 09.11.2022

#### Prototype of a cyber-physical system for monitoring the physical condition of the aircraft operator

Kyrylo Vadurin, Andriy Perekrest, Mykola Guchenko

**Abstract.** Telephones, personal computers, cars, trains, planes – all these devices have a huge number of sensors that allow to determine the current state of almost every system of the device. But they do not take into account the psycho-emotional and physical state of operators while driving such complex device. According to statistics, more than half of air crashes occur due to the human factor. To reduce the number of air crashes associated with the deterioration of the aircraft operator, it is proposed to use a mobile biomedical complex with software and hardware parts. The developed complex should take the main biological indicators of the operator in real time, store and process them, this data can be used to give advice to the operator to improve his condition. The hardware includes the following units for processing data from sensors: cardiograph; four myographs; pulse oximeter; temperature and humidity; determination of skin resistance. Data from the data processor units are collected by the microcontroller-processor, which can further convert the data into adequate physical quantities. The microcontroller-processor exchanges data with the microcontroller-server, which is designed to buffer and output data to the user's device or to cloud WEB-services. The software part includes lower-level programs for collecting measurement data, processing them, forming them into packets, exchanging packets between microcontrollers and outputting data to WEB services, as well as Backend WEB pages of the user interface. The top-level programming includes the development of WEB-pages where the current information about the state of the examined user is displayed. Currently, a model of a biomedical complex based on the Arduino UNO and NodeMCU platforms has been created, which can measure skin resistance, humidity and respiratory temperature, as well as transmit them to clients located in the local network. In the future, it is planned to: develop a system for storing data and sending them to connected users; improve the user interface and implement the functionality of quick reconfiguration of the monitoring functions of the complex; create a data processing system based on information and analytical decision support tools to generate individual recommendations for improving the physical condition of the operator.

**Keywords:** biomedical complex, WEB-server, IoT devices, cybernetic system, Arduino, ESP, hardware, software.

G. Golovko, D. Isai

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

## USAGE OF IT TECHNOLOGIES IN MEDICINE AND GENOMICS

**Abstract.** In this article, we will consider what IT technologies are most used in medicine and by genomics methods in particular, also we will take a look at the use of big data in this matter. Additionally, we will learn what a connectome is, analyze 4M and 3V frameworks in genomics. Statistics in medicine is one of the analysis tools experimental data and clinical observations, as well as the language by means of which the obtained mathematical results are reported. However, this is not the only task of statistics in medicine. Mathematical apparatus widely used for diagnostic purposes, solving classification problems and search for new patterns, for setting new scientific hypotheses. The use of statistical programs presupposes knowledge of the basic methods and stages of statistical analysis: their sequence, necessity and sufficiency. In the proposed presentation, the main emphasis is not on detailed presentation of the formulas that make up the statistical methods, and on their essence and application rules. Finally, we talk through genome-wide association studies, methods of statistical processing of medical data and their relevance. In this article, we analyzed the basic concepts of statistics, statistical methods in medicine and data science, considered several areas in which large amounts of data are used that require modern IT technologies, including genomics, genome-wide association studies, visualization and connectome data collection.

**Keywords:** genomics, connectome, medicine, statistics, GWAS, data science.

### Introduction

In the modern world, more and more industries are using IT tools to increase efficiency in the study of certain issues, including medicine, and since there is a lot of work with data, the most common methods are statistics and data science.

**Data science** is a branch of computer science that studies the problems of analyzing, processing and presenting data in digital form. Combines methods for processing data in a large volume and high level of parallelism, statistical methods, methods of data mining and artificial intelligence applications for working with data, as well as methods for designing and developing databases.

The main practical goal of professional activity in data science is the discovery of patterns in data, the extraction of knowledge from data in a generalized form. To explain the skills required for activities in this area, a Venn diagram is often used, in which the skills required by a specialist are reflected at the intersection of areas of general subject experience, practical experience in information technology (hacking skills) and knowledge mathematical statistics.

As an epistemological feature of the discipline, the priority of the practical applicability of the results, that is, the success of predictions, over their causality is indicated, while in traditional research areas it is essential to explain the nature of the phenomenon. In comparison with classical statistics, on the methods of which data science is largely based, it implies the study of super-large heterogeneous arrays of digital information and an inextricable connection with information technologies that provide their processing. In comparison with activities in the field of design and work with databases, where it is assumed that a preliminary design of a data model reflecting the relationship of the subject area and the subsequent study of the loaded data using relatively simple (arithmetic) methods, data science is supposed to rely on the apparatus of mathematical statistics, artificial intelligence, machine learning, often without first loading

the data into the model. Compared to the profession of an analyst, whose main goal is to describe phenomena based on accumulated data with relatively simple user tools (like spreadsheets or Business Intelligence class tools).

**Relevance of statistics in medicine.** Statistics in medicine is one of the analysis tools experimental data and clinical observations, as well as the language by means of which the obtained mathematical results are reported. However, this is not the only task of statistics in medicine. Mathematical apparatus widely used for diagnostic purposes, solving classification problems and search for new patterns, for setting new scientific hypotheses. The use of statistical programs presupposes knowledge of the basic methods and stages of statistical analysis: their sequence, necessity and sufficiency. In the proposed presentation, the main emphasis is not on detailed presentation of the formulas that make up the statistical methods, and on their essence and application rules.

Statistical processing of medical research is based on the principle that what is true for a random sample is also true for a population from which this sample was obtained. However, choose or select a truly random sample from the population very difficult. Therefore, one should strive to ensure that the sample is representative of the population under study, i.e. adequately enough reflecting all possible aspects of the condition or disease under study in population, which is facilitated by a clear formulation of the goal and strict adherence to criteria for inclusion and exclusion both in the study and in the statistical analysis.

### The main part of the article

Most often, the well-known “3Vs” (Volume, Velocity and Variety), which were introduced by Gartner analyst Doug Laney in 2001, are considered the main definition of big data. More precisely about the “3Vs” abbreviation:

**Volume** – the most obvious is where we'll start. Big data is volume. Volumes of data that can actually reach unprecedented heights. It is estimated that 2.5 quintillion

bytes of data are created each day, resulting in 40 zettabytes of data being created by 2020, indicating a 300-fold increase over 2005. companies to have terabytes and even petabytes of data in storage devices and servers. This data helps shape the future of the company and its actions by tracking progress.

**Velocity** – the growth of data and its consequent importance has changed the way we see data. We once didn't understand the importance of data in the corporate world, but as the way we collect it has changed, we've come to rely on it day in and day out. Velocity essentially measures how fast the data arrives. Some data will come in real time, while other data will come in bursts, sent to us in bursts. And because not all platforms will process incoming data at the same speed, it's important not to generalize, discount, or jump to conclusions without having all the facts and figures.

**Variety** – Once upon a time, data was collected from one place and delivered in one format. Once taking the form of database files such as Excel, csv, and access, they are now presented in non-traditional forms such as video, text, PDF, and social media graphics, and through technology such as wearables. While this data is extremely useful to us, it creates more work and requires more analytical skills to decipher this incoming data, make it manageable, and let it work. Big data is much more than just "a lot of data". It's a way to empower new and existing data and open up new ways to collect future data to really make a difference for business operators and make it more agile [1].

**Types of statistical data in medicine.** Statistical data can be presented as quantitative (numerical continuous or discrete), and qualitative (categorical ordinal or nominal) variables. Necessary clearly indicate the type (kind) of the variable when filling the database and accurately adhere to the selected data type, as this may affect further processing of variables in many currently used statistical programs. For example, you cannot simultaneously enter into a column variable and numeric and textual, even similar in meaning, data: if filling "yes / no" in the form of 1 or 0, then do not enter alphabetic abbreviations and vice versa.

**Quantitative** (numerical) data suggest that the variable takes some numeric value. They are **discrete** data which can take strictly defined values, while **continuous** can be represented by any value. Unique An example of quantitative data is the representation of age by two types: in the form of a continuous variable - the exact age of the patient is indicated, and in the form discrete variable - only the number of completed years is indicated (50.3 years and 50 years; 50.9 years and 51 years).

**Categoriality** is the basis for the semantic understanding of qualitative variables. Categorical data is used to describe the state of an object by assigning it a number corresponding to the category to which this object belongs. An important condition for applying categorical data is belonging of one research object to only one possible category for one criterion.

**Qualitative nominal** data are used if the categories are not ordered. The numbers in this case are only a designation for state of an object and do not order that state. For example, by gender: 1 - male, 2 - female.

**Qualitative ordinal** (rank, ordinary) data - data for which categories can be ordered. For example, from feeling unwell to good: 1 - good, 2 - fair, 3 - poor. In practice often uses the translation of quantitative data into a qualitative categorical ordered presentation, especially when calculating threshold values (cut-off) for subsequent calculations of risk characteristics or predictive value with using a contingency table. For example, 1 is the concentration of the total cholesterol is less than or equal to 5.2 mmol / l (the risk ratio for developing coronary artery disease is less than 1, the predictive value of a positive result is more than 80%), 2 - concentration of total cholesterol more than 5.2 mmol/l (risk ratio of development IHD over 1, positive predictive value over 80%).

**Types of statistical data analysis.** In the practice of processing the results of research two types of statistical data analysis are used – primary (scheduled) and secondary (unscheduled).

**Primary data analysis** - used to study and describe regularities, the existence of which is assumed by the researcher, and which are the actual hypothesis of the study. In this case analyzes the features, the study of which is taken into account when planning research, and pre-formulated hypotheses are tested.

**Secondary data analysis** - used to form prospects for the study, search, exploration of potential patterns and hypotheses. In this case, "sifting" is performed unplanned data in a particular job, which often happens it is advisable already at the first stage of acquaintance with the data.

**Genomics and Big Data.** The genome of even one simple organism consists of thousands or even tens of thousands of base pairs. The manual analysis of just one DNA strand from one chromosome takes years, if not decades. Add to this the fact that sequencing often involves cutting DNA into small pieces, and we have another task - to collect the deciphered pieces in the right order. This task, called genetic mapping, is truly titanic. And although it is still impossible to do without human mental work when finalizing the data and writing the conclusion, a significant part of the analytical work is performed by the computer (Fig. 1) [4].

Computer analysis also helps with annotation - gene labeling. This process needs to be automated because most genomes are too large for manual annotation, not to mention the need to annotate as many genomes as possible since sequencing speed is no longer an issue. The annotations are made possible by the fact that genes have recognizable start and end regions (promoters and terminators that often have similar or identical composition in different groups of organisms), although the exact sequence found in these regions may vary between genes [3].

Within the framework of computational genomics, there is also such a thing as Interactome or networks of molecular interaction. In a nutshell, this is a set of localizations and interactions of a particular molecule within one particular cell. Such a model can also describe sets of indirect interactions between genes. Molecular interactions can occur between molecules belonging to different biochemical families (proteins, nucleic acids, lipids, carbohydrates, etc.), as well as within each family.

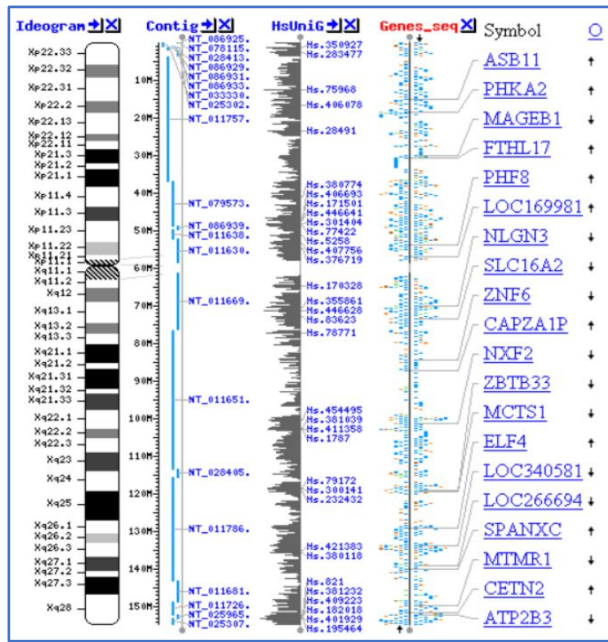


Fig. 1. Map of the human X-chromosome

When such molecules are linked by physical interactions, they form networks of molecular interactions that are usually classified according to the nature of the compounds involved. Most commonly, interactome refers to the protein-to-protein interaction network (PPI) (PIN) or variations thereof [2].

This is an extremely complex circuit, the implementation of which would not be possible without computer simulation. It is so technically complex and practically important that it has recently been singled out as an independent field of bioinformatics (Fig. 2).

**Genome-wide association studies**, in which hundreds of thousands of single nucleotide polymorphisms (SNPs) are strained for association with complaint in hundreds or thousands of people, have revolutionized the hunt for inheritable influences on complex traits. similar circumscriptions, unlike monogenic diseases, are caused by numerous inheritable and environmental components acting consecutively, each of which has a fairly small effect and just a many of which are absolutely critical for the onset of the complaint.

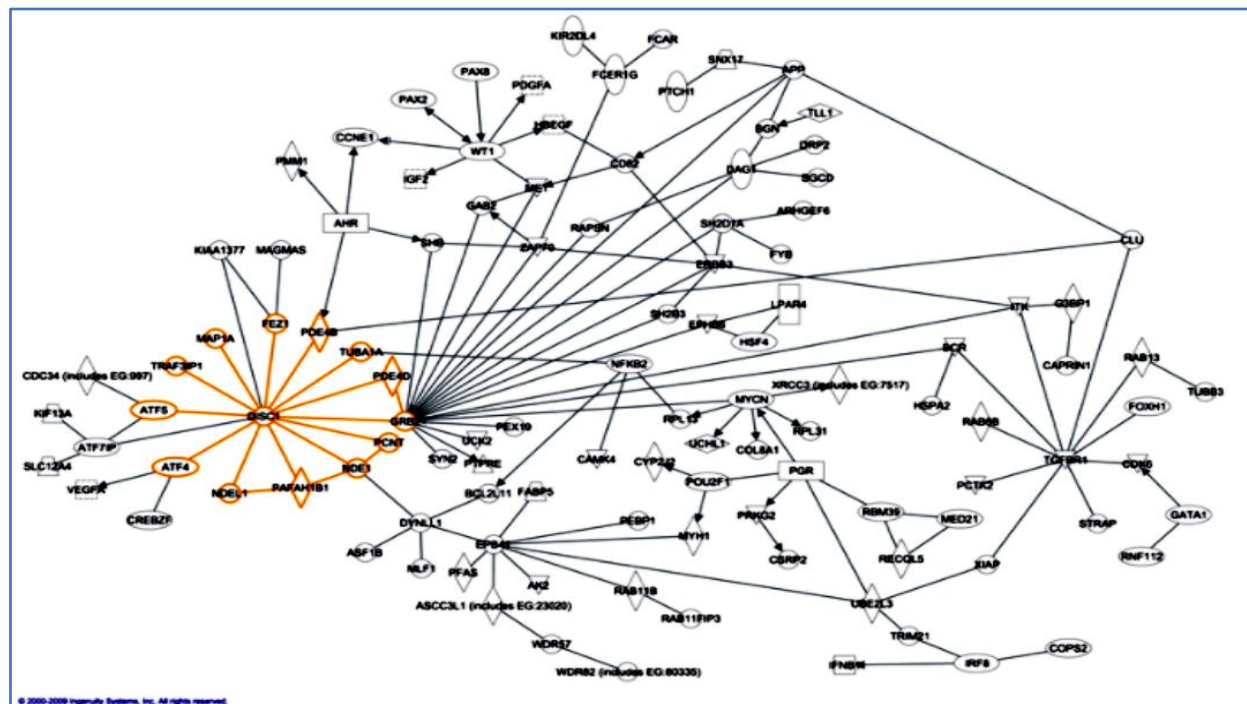


Fig. 2. Part of the interaction of DISC1 (the gene whose mutations are responsible for schizophrenia) with genes is represented by text in boxes, and the interactions are marked by lines between genes.

Although complex conditions have been characterized as a geneticist's agony, over the past 5 years, genome-wide association studies have linked SNPs associated with hundreds of reliably replicating loci for common traits (Fig. 3) [6].

The quantum of data in these studies is four to five orders of magnitude lesser than that in the former generation of case – control studies, which tested only a sprinkle of variants, frequently in a specific seeker gene. This unknown volume poses unusual statistical cases for the analysis, demonstration, and interpretation of the data [7].

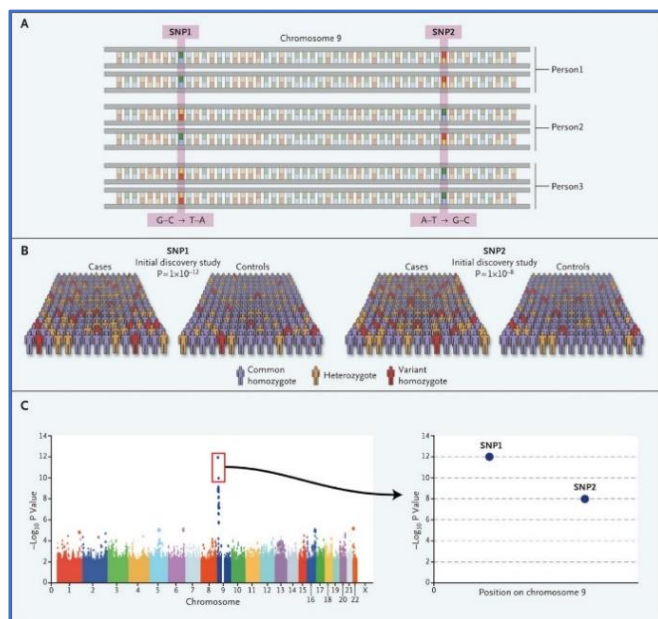
One constantly used approach to managing size is the tiered design, in which a subset of SNPs set up to be

considerable in the genome-wide association study (occasionally called the discovery set) is genotyped in an alternate league ( a replication set), delivering a lower subset of significantly banded SNPs that are also tested in a third league (an alternate replication set), and so on. This process helps to identify false positive associations. Carrying ahead a big number of SNPs linked through a genome-wide association study into a test of replication additionally minimizes false negative solutions while raising the bar for the establishment of true positive results.

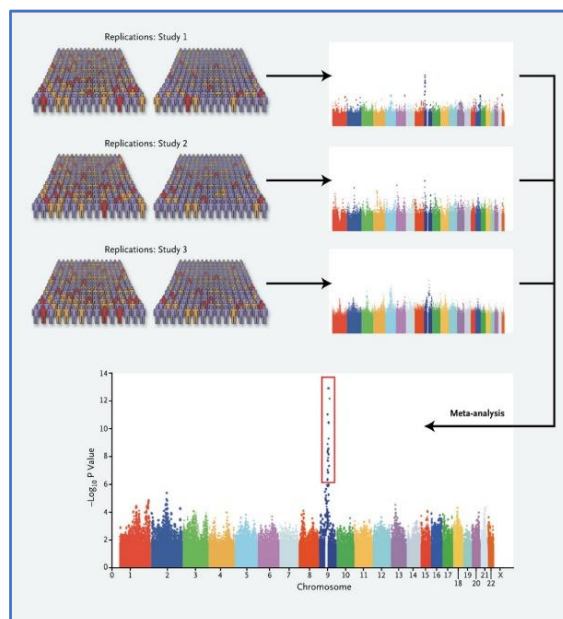
The pooling of answers attained in genome-wide association studies (Fig. 4) under the auspices of big

colleges is frequently needed for the discovery of variants with small goods on the threat of complaint. similar pooled advisements, like all genetic association studies, must be delved and administrated for alterations in allele frequency between categories that can lead to spurious

(false positive) associations. The most dependable substantiation of a true genetic association, short of prescribing the unproductive variant functionally, is replication of the association, notably if it appears in multiple populations [8].



**Fig. 3.** The genome-wide association study



**Fig. 4.** Meta-analysis of genome-wide association studies

**Connectome.** Networks of brain connections can be emblemized at individual scales, which accord to the situations of spatial resolution in brain imaging. These situations can be roughly classified as microscale, mesoscale, and macroscale. Eventually, it'll be possible to join the results attained at different situations into a single hierarchical chart of neuronal association, which will be suitable to show a single neuron in a population of neurons up to similar large systems as cortical regions. Due to the fact that different individualities will have differences in connectomes, any unified chart is likely to give probabilistic information about the connectivity of neurons [5].

**Datasets and Network Measures.** Network commentaries were acquitted out for high- resolution connection matrices ( $n = 998$  regions of interest (ROIs) with an average size of  $1.5 \text{ cm}^2$ ), as well as for indigenous connection matrices ( $n = 66$  anatomical subregions). All networks defended the complete cortices of both components but barred subcortical bumps and appointments. When not alluded else, the data shown in this article are grounded on the analysis of individual high- resolution connection matrices, observed by comprising across five human actors [9].

**Network Visualizations.** A representative illustration of a high- resolution structural connection matrix of an individual human brain is shown in Fig. 5, A. Entries of the matrix emblemize fiber consistence between dyads of single ROIs. The matrix shown in the illustration displays an aggregate of 865 symmetric connections (connection viscosity 3.0). To visualize structural arrangements within this connection matrix,

we uprooted the connectivity backbone, which is displayed in Fig. 5,B with a layout deduced from the Kamada-Kawai force-spring algorithm enforced in Pajek. The algorithm generates a spatial arrangement of ROIs along easily defined anterior-posterior and medium-side axes and reveals clusters of thick connectivity within posterior, carnal, and anterior cortex. Fig. 5,C shows the connectivity backbone colluded in anatomical equals. The rearward view shows groupings of largely connected clusters of ROIs arranged along the medium cortical face, extending from the precuneus via posterior and anterior cingulate cortex to the medium orbitofrontal cortex. Rearward and side views also show clusters of temporal and anterior ROIs in both components [9].

Some of the major challenges in erecting the human connectome at the micro position moment include:

- data collection would take times with current technology,
- machine vision tools are presently in their immaturity,
- there is no proposition or algorithms to dissect the incoming data.

## Conclusion

In this article, we analyzed the basic concepts of statistics, statistical methods in medicine and data science, considered several areas in which large amounts of data are used that require modern IT technologies, including genomics, genome-wide association studies, visualization and connectome data collection.

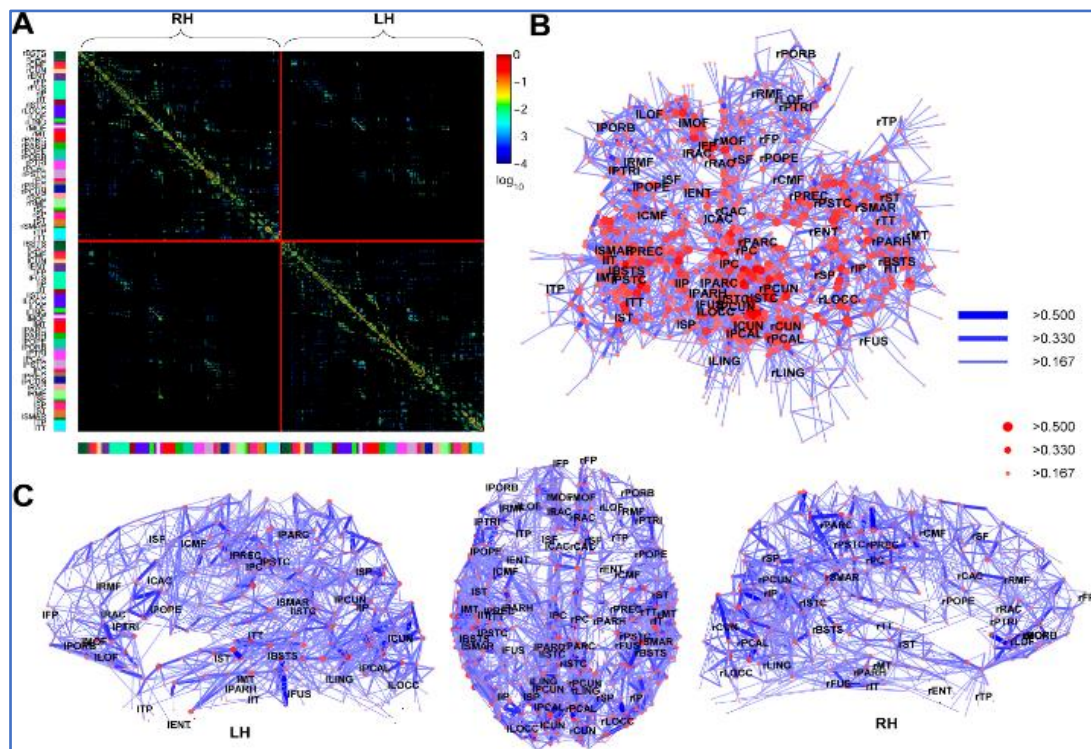


Fig. 5. High-Resolution Connection Matrix, Network Layout and Connectivity Backbone (Participant A, scan 2)

#### REFERENCES

1. Naur, Peter. A Basic Principle of Data Science // Concise Survey of Computer Methods. - Lund, 1974. - 397 p. - (Studentlitteratur). — ISBN 91-44-07881-1.
2. William S. Cleveland. Data Science: An Action Plan for Expanding the Technical Areas of the Field of Statistics // International Statistical Review: Journal. - Wiley & Sons, 2001. - Vol. 69, issue 1. - P. 21-26. — ISSN 1751-5823.
3. Hey T, Trefethen A. The data deluge: an e-science perspective. In: Berman F, Fox G, Hey T, editors. Grid computing: making the global infrastructure a reality. Chichester: Wiley-Blackwell; 2003. p. 809–24.
4. Greenbaum D, Luscombe NM, Jansen R, Qian J, Gerstein M. Interrelating different types of genomic data, from proteome to secretome: 'oming in on function. *Genome Res.*2001;11:1463–8.
5. Sebastian Seung, *Connectome: How the Brain's Wiring Makes Us Who We Are*, 2012 — ISBN 978-0547508184
6. Manolio TA (July 2010). "Genomewide association studies and assessment of the risk of disease". *The New England Journal of Medicine.* 363 (2): 166–76.
7. Smith SM, Douaud G, Chen W, Hanayik T, Alfaro-Almagro F, Sharp K, Elliott LT (2021). "An expanded set of genome-wide association studies of brain imaging phenotypes in UK Biobank"
8. Rosenberg NA, Huang L, Jewett EM, Szpiech ZA, Jankovic I, Boehnke M (May 2010). "Genome-wide association studies in diverse populations". *Nature Reviews Genetics.* 11 (5): 356–66.
9. Hagmann P., Cammoun L., Gigandet X., Meuli R., Honey C. J., Wedeen V. J., Sporns O. Mapping the structural core of human cerebral cortex // *PLoS Biol.*: journal. — 2008. — July (vol. 6, no. 7). — P. e159.

Received (Надійшла) 12.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.11.2022

#### Використання ІТ-технологій в медицині та геноміці

Г. В. Головка, Д. А. Ісай

**Анотація.** У цій статті ми розглянемо, які ІТ-технології найбільше використовуються в медицині і методами геноміки зокрема, а також розглянемо використання big data в цьому питанні. Додатково ми дізнаємося, що таке коннектом, розберемо фреймворки 4M і 3V в геноміці. Статистика в медицині є одним із інструментів аналізу експериментальних даних і клінічних спостережень, а також мовою, за допомогою якої повідомляються отримані математичні результати. Однак це не єдине завдання статистики в медицині. Математичний апарат широко використовується для діагностичних цілей, вирішення задач класифікації та пошуку нових закономірностей, для постановки нових наукових гіпотез. Використання статистичних програм передбачає знання основних методів і етапів статистичного аналізу: їх послідовності, необхідності та достатності. У запропонованій презентації основний акцент робиться не на детальному викладі формул, з яких складаються статистичні методи, а на їх сутності та правилах застосування. Нарешті, ми говоримо про дослідження асоціацій у всьому геномі, методи статистичної обробки медичних даних та їх актуальність. У цій статті ми проаналізували основні поняття статистики, статистичні методи в медицині та науку про дані, розглянули кілька сфер, у яких використовуються великі обсяги даних, які вимагають сучасних ІТ-технологій, включаючи геноміку, дослідження загальногеномних асоціацій, візуалізацію та дані коннектомів.

**Ключові слова:** геноміка, коннектом, медицина, статистика, GWAS, наука про дані.

G. Golovko, M. Tolochyn

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

## USING THE AES ENCRYPTION METHOD IN PRACTICE

**Abstract.** Analysis of recent research and publications shows that Encryption methods vary by how much data they can handle at once and what kind of key it needs for its decryption. Some encryption is more easily hacked than others. While some companies or individuals choose encryption type according to standards dictated by legal or industrial regulations, others may simply choose their type based on personal preference. It matters to you because it's your data that's being protected. You will want the best encryption type for the data you are storing or transmitting. This article tells about the practical application of such a data encryption method as AES in a tractor enterprise, which includes more than 50 personal computers with data that must be protected. Therefore, the article considers the method AES, a symmetric block cipher chosen by the U.S. government to protect classified information to be the best for company. AES is implemented in software and hardware throughout the world to encrypt sensitive data. It is essential for government computer security, cybersecurity and electronic data protection. Information security, sometimes shortened to InfoSec, is the practice of protecting information by mitigating information risks. It is part of information risk management. It typically involves preventing or reducing the probability of unauthorized/inappropriate access to data, or the unlawful use, disclosure, disruption, deletion, corruption, modification, inspection, recording, or devaluation of information. It also involves actions intended to reduce the adverse impacts of such incidents. Protected information may take any form, e.g. electronic or physical, tangible (e.g. paperwork) or intangible.

**Keywords:** tractor factory, cyber security, encryption, algorithm, AES, access.

### Introduction

**Analysis of recent research and publications** shows that Encryption methods vary by how much data they can handle at once and what kind of key it needs for its decryption. Some encryption is more easily hacked than others. While some companies or individuals choose encryption type according to standards dictated by legal or industrial regulations, others may simply choose their type based on personal preference. It matters to you because it's your data that's being protected. You will want the best encryption type for the data you are storing or transmitting.

The three major encryption types are DES, AES, and RSA. While there are many kinds of encryption - more than can easily be explained here - we will take a look at these three significant types of encryption that consumers use every day. Most of the others are variations on older types, and some are no longer supported or recommended. Tech is evolving every day and even those considered to be modern will be replaced by newer versions at some point.

Just as security tech is taking steps to increase the safety of your information, hackers are finding ways around them. It's an arms race with your data as the spoils of war. Let's dive in to popular encryption methods, the history of encryption, and where it's going next. [1]

**The purpose of the article** is to decide why the AES encryption method is the best for such a factory like tractor repair company

### The main part of the article

**Why should you use AES encryption?** AES was developed to provide the highest level of security for the most sensitive data. The National Security Agency (NSA) and other agencies selected this method as the US government's security standard due to its extensive, impenetrable protection. AES is also used across many other government agencies and industries.

• Healthcare companies benefit from AES by encrypting their extensive databases of patient files,

including medical history and personal information. The National Institute of Standards and Technology (NIST) recommends using AES to meet Health Insurance Portability and Accountability Act (HIPAA) regulations.

• Banks and other financial institutions rely on AES encryption to protect their customers' personal and transactional information.

• Insurance companies such as Aetna use AES to mitigate risk exposure in specific devices that are used to access customer information.

Even if your business doesn't fall under the umbrellas of government, healthcare, or finance, you can still employ the same level of security. Any precious information should be stored as safely as possible, and it might surprise you to know how many industries outside of the government have already adopted AES.

In fact, as of 2021, AES is the world's most popular data protection method.

Wi-Fi networks, Google Cloud, Facebook Messenger, Java programming, and many password managers use AES encryption to protect sensitive data.

This wide variety of applications shows that you can adapt AES for nearly any environment, and it's secure enough for even the most sensitive data [2].

**Company description.** Tolochyn Tractor repair company is a professional tractor repair association that offers repair services for:

- scheduled maintenance of the tractor;
- tractor engine overhaul;
- body restoration and repair;
- glow plug replacement;
- tire and wheel replacement;
- front axle repair;
- hydraulic system;
- diagnostics;
- diagnostics and repair of the electronic part of the tractor;
- management and calculation of oil consumption;
- effective conversion of oil into electricity;

- development of oil production methods;
- management and efficient sale of oil.

The company includes the following departments: forge, welding, radiator department, mechanics department, electroplating department, tire shop, polymer department, secretary, general manager, unit repair, chief mechanic department. As you can see, the company has many departments that specialize in a certain area related to the repair of tractor units. each such

department has personal computers that are connected via a network and have secret information that cannot be distributed outside the plant. Therefore, a method of data cryptography is needed for the enterprise

**Equipment placement plan.** On the Fig. 1 you can see equipment placement plan. As you can see, it is complicated due to company needs. According to the building plan, 78 computers, 2 printers, 6 MFPs and 1 server were placed.



**Fig. 1.** Equipment placement plan

**Data encryption at the enterprise. Presentation of the application.** To encrypt data for the enterprise, it was chosen to develop a program that would encrypt and decrypt text using the AES (Advanced Encryption Standard, also known as Rijndael) cipher.

Advanced Encryption Standard is a symmetric block encryption algorithm (block size 128 bits, key 128/192/256 bits), a finalist in the AES competition and adopted as an American encryption standard by the US government. The choice fell on AES with the expectation

of widespread use and active analysis of the algorithm, as was the case with its predecessor, DES.

Advanced Encryption Standard (AES) is one of the most widely used and most secure encryption algorithms available today. It is publicly available and is the cipher used by the NSA to secure Top Secret documents. Its success story began in 1997, when NIST (National Institute of Standards and Technology) officially began looking for a replacement for the aging DES standard. The algorithm called Rijndael, developed by Belgian cryptographers



Daemen and Rijmen, was characterized by increased security, as well as performance and flexibility. [3]

It came out on top among several competitors and was officially announced in 2001 as the new AES encryption standard. The algorithm is based on multiple permutations, permutations, and linear transformations, each performed on 16-byte blocks of data, hence the term blockcipher. These operations are repeated several times, called "rounds". During each round, a unique round key is calculated from the encryption key and included in the calculations. Based on the block structure of AES, changing a single bit in either a key or a block of plaintext

results in a different block of ciphertext - a clear advantage over traditional stream ciphers. Finally, the difference between AES-128, AES-192, and AES-256 is the key length: 128, 192, or 256 bits, all radical improvements over the 56-bit DES key. As an illustration, cracking a 128-bit AES key with a modern supercomputer would take longer than the estimated age of the universe. And Boxcryptor even uses 256-bit keys! To date, there is no real attack on AES. Therefore, AES remains the preferred encryption standard for governments, banks, and high-security systems around the world. Fig. 2 demonstrates how the method is working.

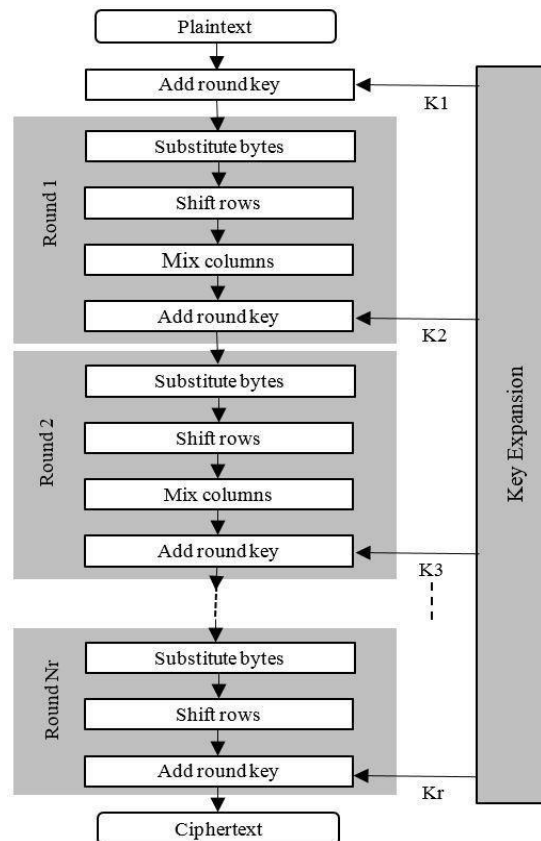


Fig. 2. Scheme of AES method

Brief overview of the created program for data encryption in the plant and its functions, initial window is on Fig. 3.

Text encryption is displayed on the Fig. 4. Text decoding by the program is shown on the Fig. 5.

The program also provides for cases when the user left the fields blank, for example encrypted text when decryption is required, or did not enter a numeric key. In such cases, the program will give a message explaining the error.

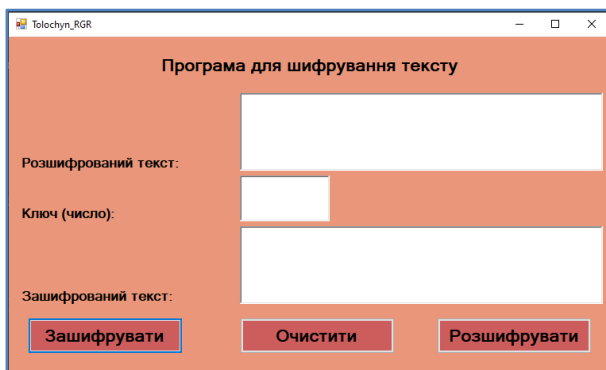


Fig. 3. Initial window of the program

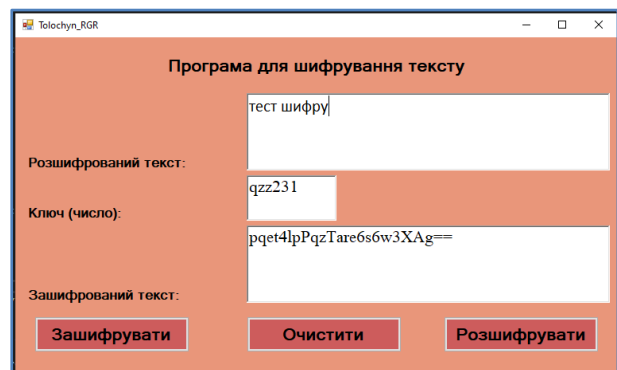


Fig. 4. Text encryption process

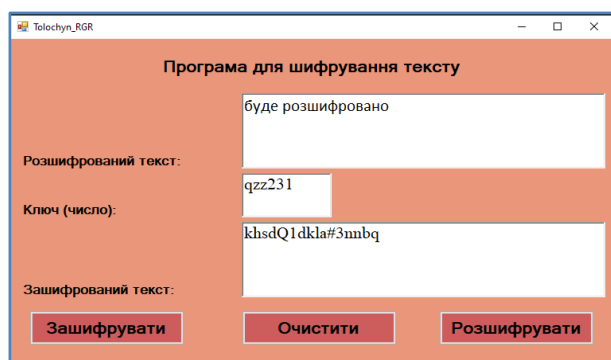


Fig. 5. Text decryption

The applications of the AES Encryption algorithm are as follows:

- **Wireless Security:** Wireless networks are secured using the Advanced Encryption Standard to authenticate routers and clients.
- **WiFi networks** have firmware software and complete security systems based on this algorithm and are now in everyday use.
- **General File Encryption:** Apart from corporate necessities, AES is also used to transfer files between associates in an encrypted format.

### Conclusions

Information security, sometimes shortened to InfoSec, is the practice of protecting information by mitigating information risks. It is part of information risk

management. It typically involves preventing or reducing the probability of unauthorized/inappropriate access to data, or the unlawful use, disclosure, disruption, deletion, corruption, modification, inspection, recording, or devaluation of information.

It also involves actions intended to reduce the adverse impacts of such incidents.

Protected information may take any form, e.g. electronic or physical, tangible (e.g. paperwork) or intangible (e.g. knowledge). Information security's primary focus is the balanced protection of the confidentiality, integrity, and availability of data (also known as the CIA triad) while maintaining a focus on efficient policy implementation, all without hampering organization productivity.

This is largely achieved through a structured risk management process [4].

Encrypting data in transit and data at rest helps ensure data confidentiality and integrity. Digital signatures are commonly used in cryptography to validate the authenticity of data. Cryptography and encryption has become increasingly important. A good example of cryptography use is the Advanced Encryption Standard (AES). The AES is a symmetric key algorithm used to protect classified government information [5].

In this particular case, a computer program was created to encrypt and decrypt important data of a tractor repair company that cannot be disclosed outside the company, based on such a data encryption method as AES.

### REFERENCES

1. What Are the Different Types of Encryption?, URL: <https://www.hp.com/us-en/shop/tech-takes/what-are-different-types-of-encryption#:~:text=The%20three%20major%20encryption%20types%20are%20DES%2C%20AES%2C%20and%20RSA>
2. Is AES Encryption the Right Choice for Your Company?, URL: <https://winzip.com/blog/enterprise/aes-encryption-explained>
3. Data encryption using the XOR cypher G. Golovko, A. Matyashenko, N. Solopikhin - journal "Control, Navigation and Communication Systems". 2021. 81 p.
4. Information security, URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Information\\_security](https://en.wikipedia.org/wiki/Information_security)
5. What Is Information Security, URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/security/what-is-information-security-infosec.html>

Received (Надійшла) 05.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.11.2022

### Практичне застосування метода шифрування AES

Г. В. Головка, М. О. Толочин

**Анотація.** Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що методи шифрування відрізняються залежно від того, скільки даних вони можуть обробити одночасно та який ключ потрібен для їх дешифрування. Деякі засоби шифрування легше зламати, ніж інші. У той час як деякі компанії або окремі особи обирають тип шифрування відповідно до стандартів, що продиктовані юридичними чи промисловими нормами, інші можуть просто вибрати свій тип на основі особистих уподобань. Це важливо для вас, тому що ваші дані захищені. Вам потрібен найкращий тип шифрування для даних, які ви зберігаєте або передаєте. У цій статті розповідається про практичне застосування такого методу шифрування даних, як AES, на тракторному підприємстві, яке включає понад 50 персональних комп'ютерів з даними, які необхідно захищати. Тому в статті найкращим для компанії вважається метод AES, симетричний блоковий шифр, обраний урядом США для захисту секретної інформації. AES реалізовано в програмному та апаратному забезпеченні по всьому світу для шифрування конфіденційних даних. Це має важливе значення для комп'ютерної безпеки уряду, кібербезпеки та захисту електронних даних. Інформаційна безпека, іноді скорочена до InfoSec, — це практика захисту інформації шляхом зменшення інформаційних ризиків. Це частина управління інформаційними ризиками. Зазвичай це передбачає запобігання або зменшення ймовірності несанкціонованого/неналежного доступу до даних або незаконного використання, розголошення, порушення, видалення, пошкодження, модифікації, перевірки, запису або знецінення інформації. Це також передбачає дії, спрямовані на зменшення негативних наслідків таких інцидентів. Захищена інформація може мати будь-яку форму, напр. електронні або фізичні, матеріальні (наприклад, документи) або нематеріальні.

**Ключові слова:** тракторний завод, кібербезпека, шифрування, алгоритм, AES, доступ.

Г. М. Дреєва

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

## МЕТОД ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТРАФІКУ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ З ФРАКТАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

**Анотація.** Метою даної роботи є створення методу імітаційного моделювання трафіку комп'ютерної мережі з фрактальними властивостями для тестування мережевих алгоритмів та протоколів. Об'єктом дослідження є процес імітаційного моделювання мережевого трафіку. Предметом дослідження є методи та алгоритми моделювання часового ряду з фрактальними властивостями. В наш час для математичного опису телекомунікаційних процесів використовують математичні моделі самоподібного часового ряду. В більшості випадків для самоподібного трафіку, передбачення параметрів за якістю обслуговування QoS, аналітичні вирази побудувати не вдається, або такі перетворення можливо побудувати для занадто специфічних ситуацій, тому переважно аналітичні викладки є недоцільними. З цієї причини для визначення основних показників якості обслуговування, таких як джитер, запізнення, середня кількість відмов, та інших, використовують імітаційне моделювання за допомогою генераторів самоподібного трафіку. Це призводить до потреб в простих, з точки зору кількості обчислень, генераторів самоподібного трафіку з керованими фрактальними властивостями, які б давали числові послідовності з властивостями якомога ближчими до властивостей реального трафіку телекомунікаційної мережі, що досліджується. У даній роботі запропоновано метод імітаційного моделювання трафіку комп'ютерної мережі з фрактальними властивостями. Для генерації трафіку використано теорію фрактального аналізу та теорію марківських процесів. Даний метод може бути частиною програмної імітаційної моделі комп'ютерної мережі, яку в свою чергу можна використати для тестування мережевих алгоритмів та протоколів. Також розроблену імітаційну модель мережевого трафіку планується використовувати у подальшому для тестування якості методів визначення фрактальної розмірності часових рядів, а також для прогнозування завантаженості мережевих пристроїв у комп'ютерних мережах.

**Ключові слова:** комп'ютерні мережі, мережевий трафік, фрактальна розмірність, марківські процеси, імітаційне моделювання, програмна імітаційна модель

### Вступ

При рішенні задач прогнозування та оптимізації роботи комп'ютерних та телекомунікаційних мереж є практично обов'язковим врахування фрактальної природи трафіку в мережі Інтернет [1-4].

Мережевий трафік має фрактальні властивості і може аналізуватися та моделюватися з застосуванням теорії фрактального аналізу [5]. Було проведено дослідження, яке показало, що марківські процеси часто використовуються для моделювання трафіку різних систем масового обслуговування [6-12]. Тож генерація трафіку для відтворення його фрактальних властивостей у даній роботі відбувається на основі теорії марківських процесів.

Проведений аналіз публікацій [13-21] показав актуальність питання моделювання трафіку у комп'ютерних мережах. Зокрема, в [13] була проведена оцінка часу затримки пакетів в умовах зв'язку при обслуговуванні трафіку складної структури на основі розробленої імітаційної моделі. В [14] проаналізовані сучасні методи моделювання мережевого трафіку. Показано, що створення універсальної імітаційної моделі з їх допомогою проблемне з причини великого обсягу дослідницької роботи, необхідної для адаптації приватних моделей до всього різноманіття характеристик різних джерел мережевого навантаження і конфігурації мережі. Запропоновано застосування контекстних методів для побудови універсальної імітаційної моделі. В якості основи для побудови універсальної імітаційної моделі обраний метод динамічного марковського моделювання. Проведена адаптація методу динамічного марковського моделювання для універсальної імітацій-

ної моделі і розроблена методика його застосування. У роботі [15] сформульована математична модель мультисервісного каналу зв'язку на основі експоненційної GERT-мережі. У працях [16-18] розглянуті питання генерації фрактального трафіку. У роботах [19-21] пропонується метод агрегування фрактального трафіку телекомунікаційних мереж, його прогнозування та аналіз.

Виходячи з аналізу останніх досліджень і публікацій можна зробити висновок, що питання моделювання трафіку та використання для цих цілей генераторів фракталоподібних послідовностей є актуальним.

**Метою цієї роботи** є розробка та дослідження програмної імітаційної моделі фрактального мережевого трафіку.

### Основна частина

В наш час для математичного опису телекомунікаційних процесів використовують математичні моделі самоподібного часового ряду. На графіках, де зображена завантаженість каналу комп'ютерної мережі самоподібність виражена наявністю викидів, кількість яких перевищує передбачення на основі класичної статистичної теорії (рис. 1), де на горизонтальній осі показаний час в умовних одиницях, а по вертикалі завантаженість мережі відносно максимальної пропускної спроможності.

У [22] основну увагу присвячено використанню навченої нейронної мережі для автоматизації класифікації трафіку за його фрактальними та мультифрактальними властивостями. Автори успішно використовують результати роботи для детектування DDoS атак.

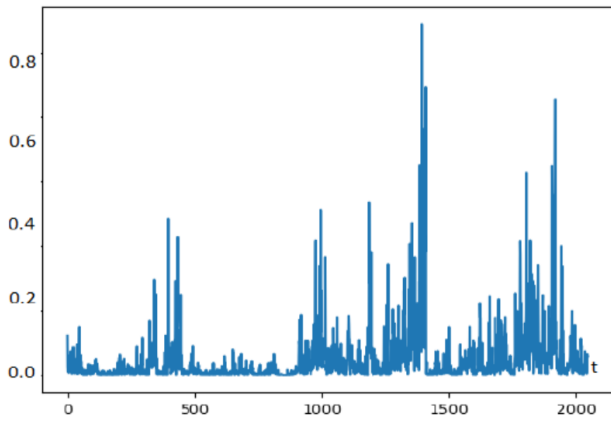


Рис. 1. Приклад самоподібного трафіку [22]

В більшості випадків для самоподібного трафіку, передбачення параметрів за якістю обслуговування QoS, аналітичні вирази побудувати не вдається, або такі перетворення можливо побудувати для занадто специфічних ситуацій, тому переважно аналітичні викладки є недоцільними. З цієї причини для визначення основних показників якості обслуговування, таких як джитер, запізнення, середня кількість відмов, та інших, використовують імітаційне моделювання за допомогою генераторів самоподібного трафіку. Це призводить до потреб в простих, з точки зору кількості обчислень, генераторів самоподібного трафіку з керованими фрактальними властивостями, які б давали числові послідовності з властивостями якомога ближчими до властивостей реального трафіку телекомунікаційної мережі, що досліджується.

Сучасні системи керування трафіком враховують його фрактальні властивості. Мережевий трафік можна представити у вигляді часового ряду. В системах, де використовують пакетний обмін інформацією, більш зручно використовувати бінарний часовий ряд, як представлення трафіку на рівні «пакет даних присутній», «пакету даних немає».

Для проведення експериментів було вирішено провести імітаційне моделювання мережевого трафіку з заздалегідь заданими властивостями. Моделювання було вирішено провести на основі теорії марківських процесів, що часто використовується для моделювання трафіку різних систем масового обслуговування [6-12]. Для генерації фрактального бінарного трафіку використано ланцюг Маркова, показаний на рис. 2.

В цій роботі для симуляції мережевого трафіку було створено бінарний часовий ряд, персистентність якого регулюється заданням ймовірностей зміни стану на протилежний  $\lambda_1, \lambda_2$  (рис. 2).

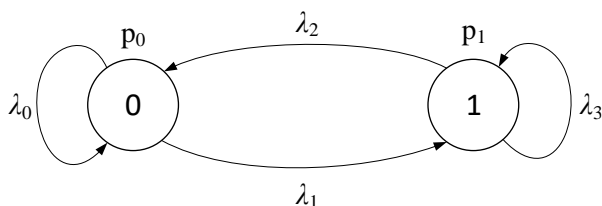


Рис. 2. Ланцюг Маркова, використаний для генерації фрактального бінарного трафіку

Цей генератор характеризується станами 0 або 1, та ймовірностями знаходження в цих станах як  $p_0 = \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2)$  та  $p_1 = \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2)$ , де  $\lambda_i$  – ймовірності відповідних переходів [23]. Інтенсивність трафіку такого генератора буде в межах  $[0, 1]$  і дорівнюватиме ймовірності отримати на виході генератора 1:  $p_1$ . Алгоритм роботи такого генератора показано на рис. 2.

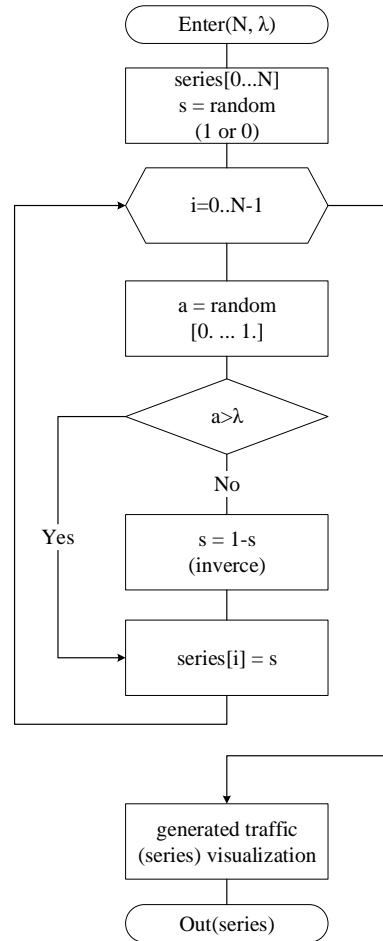


Рис. 3. Алгоритм імітаційного моделювання трафіку з фрактальними властивостями

Генерування трафіку інтенсивністю  $1/2$  починається із задання ймовірності збереження стану  $\lambda$ . Алгоритм містить змінну для збереження попереднього стану. В циклі повторюється генерування псевдовипадкового числа з діапазону  $[0; 1]$  з рівномірним розподілом, для якого проводиться порівняння із заданою ймовірністю  $\lambda$ . При проходженні тесту на порівняння, стан зберігається, і на вихід дається значення попереднього стану, інакше стан змінюється на протилежний. Очікується, що генерований бінарний трафік за цим алгоритмом має керовану фрактальну розмірність згідно співвідношенню (1), одержаному у [24]:

$$D(\lambda_1, \lambda_2) = 1 - \frac{(\lambda_2(1-\lambda_1)\ln(1-\lambda_1) + \lambda_1(1-\lambda_2)\ln(1-\lambda_2))}{2\lambda_1\lambda_2} \quad (1)$$

З метою визначення фрактальних властивостей бінарних рядів, отриманих генератором з рис. 3, було проведено експериментальне вимірювання коефіцієнта Херста методом R/S аналізу, результати якого показано на рис. 4.

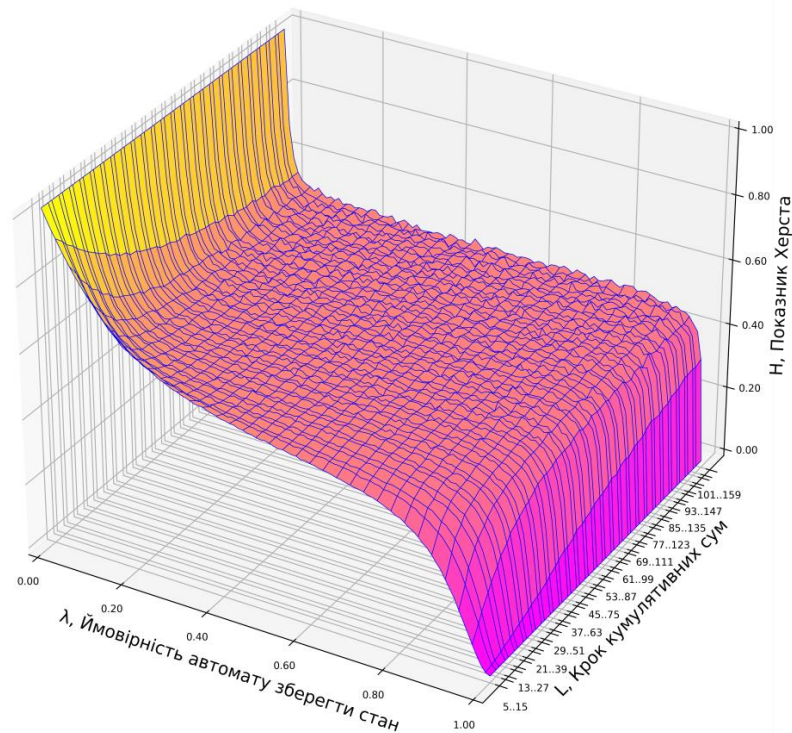


Рис. 4. Результати експериментального вимірювання коефіцієнту Херста  $H$

Рис. 4 містить результати аналізу бінарного трафіку інтенсивністю  $p_1=0.5$ . Для цього достатньо виконання умови рівності ймовірностей переходів  $\lambda = \lambda_0 = \lambda_3$ , або, що рівносильно  $\lambda_1 = \lambda_2$ . Цей показник відповідає за персистентність часового ряду і впливає на його фрактальні властивості. Також для розрахунку коефіцієнту Херста  $H$ , потрібно виділяти серії випадкового блукання – кумулятивні (накопичувальні) суми. Кількість кроків накопичувальних сум показано окремою віссю  $L$ .

На рис. 4 видно, що при зменшенні довжини кумулятивних сум, графік прямує до прямої лінії, яка сполучає одиничне та нульове значення коефіцієнту Херста. Напроти, якщо кумулятивні суми є досить довгими, коефіцієнт Херста прямує до значення 0.5 без відображення персистентності часового ряду.

Результат показаний на рис. 4 відповідає ситуації, при якій збільшення довжини кумулятивних сум підвищує точність пошуку значення коефіцієнту Херста, проте нівелює значення короточасних

залежностей фрактального трафіку. Це є протерічем, яке вимагає додаткових досліджень визначення фрактальності в числових рядах.

### Висновки

У цій роботі запропоновано метод імітаційного моделювання трафіку комп'ютерної мережі з фрактальними властивостями. Для генерації трафіку використано теорію фрактального аналізу та теорію марківських процесів.

Даний метод може бути частиною програмної імітаційної моделі комп'ютерної мережі, яку в свою чергу можна використати для тестування мережеских алгоритмів та протоколів.

Розроблену імітаційну модель мережевого трафіку планується використовувати у подальшому для тестування якості методів визначення фрактальної розмірності часових рядів, а також для прогнозування завантаженості мережеских пристроїв у комп'ютерних мережах.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zmeškal O., Nežádal M., Komendová B., Julínek M., Bžatek T. (2003), "Fractal analysis of printed structure images", Institute of Physical and Applied Chemistry, of the methods used to perform analysis listed above, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic.
2. Leland W., Taqqu M., Willinger W. (1997), "On the self-similar nature of IP-traffic", IEEE/ACM Transactions on Networking, № 3, P. 423-431.
3. Кучук Г.А. (2005), "Метод дослідження фрактального мережного трафіка", Системи обробки інформації, Вип. 5 (45), Харків, Україна, С. 74-84.
4. Кучук Г.А., Можаяв О.О., Воробйов О.В. (2006), "Аналіз та моделі самоподібного трафіка", Авиационно-космическая техника и технология, № 9(35), С. 173-180.
5. Drieieva H., Drieiev O., Meleshko Ye., Yakymenko M., Mikhav V. (2022), "A method of determining the fractal dimension of network traffic by its probabilistic properties and experimental research of the quality of this method", CEUR -WS, Vol. 3171, Gliwice, Poland, R. 1694-1707, available at: <http://ceur-ws.org/Vol-3171/paper120.pdf>
6. Meleshko Ye., Drieiev O., Yakymenko M., Lysytsia D. (2020), "Developing a model of the dynamics of states of a recommendation system under conditions of profile injection attacks", Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,

- Vol. 4, No. 2(106), pp. 14-24, available at: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85096707995&origin=resultlist>
7. Meleshko Ye., Raskin L., Semenov S., Sira O. (2019), "Methodology of probabilistic analysis of state dynamics of multi-dimensional semi-Markov dynamic systems", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, No. 4(102), pp. 6-13, available at: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85078054250&origin=resultlist>
  8. Dimitrakos TD, Kyriakidis EG (2008), "A semi-Markov decision algorithm for the maintenance of a production system with buffer capacity and continuous repair times", *International Journal of Production Economics*, Vol. 111(2), pp. 752-762, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.03.010>
  9. Li Q.-L., Lui JCS, (2014), "Block-structured supermarket models, *Discrete Event Dynamic Systems*", Vol. 26(2), pp. 147-182, doi: <https://doi.org/10.1007/s10626-014-0199-1>
  10. Okamura H., Miyata S., Dohi T., (2015), "A Markov Decision Process Approach to Dynamic Power Management in a Cluster System", *IEEE Access*, Vol. 3, pp. 3039-3047, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2015.2508601>
  11. Li Q.-L. (2016), "Nonlinear Markov processes in large networks", *Special Matrices*, Vol. 4(1), doi: <https://doi.org/10.1515/spma-2016-0019>
  12. Feinberg EA, Yang F., (2015), "Optimal pricing for a GI/M/k/N queue with several customer types and holding costs", *Queueing Systems*, Vol. 82(1-2), pp. 103-120, doi: <https://doi.org/10.1007/s11134-015-9457-7>
  13. Ушанев К.В. (2015), "Имитационные модели системы массового обслуживания типа Ра/М/1, Н2/М/1 и исследование на их основе качества обслуживания трафика со сложной структурой", *Системы управления, связи и безопасности*. 2015, №4, С.217-251.
  14. Добровольский Е.В., Нечипорук О.Л. (2005), "Моделирование сетевого трафика с использованием контекстных методов", *Наукові праці Одеської національної академії зв'язку імені О. С. Попова*, Одеса, Україна, № 1, С.24-32.
  15. Семенов С.Г., Мелешко С.В., Ілюшко Я.В. (2011), "Математическая модель мультисервисного канала связи на основе экспоненциальной GERT-сети", *Системи озброєння і військова техніка*, Харків, Україна, № 3(27), С.64-67.
  16. Radivilova T., Ibrahim Y. Daradkeh, Kirichenko L. (2018), "Development of QoS Methods in the Information Networks with Fractal Traffic", *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 64 (1), P. 27-32.
  17. Barat M., Joveini Z., Sadri J., Khoushhal H.A. (2018), "Fractal Modeling of Big Data Networks", *International Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence (ICPRAI 2018)*, Canada, Montreal: Concordia University, P. 1-4.
  18. Jiang D., Huo L., Li Y. (2018), "Fine-granularity inference and estimations to network traffic for SDN", *PLoS ONE*, No13(5), doi: [doi: doi.org/10.1371/journal.pone.0194302](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194302)
  19. Кучук Г.А., Можасв О.О., Воробйов О.В. (2007), "Прогнозирование трафика для управления перегрузками интегрированной телекоммуникационной сети", *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*, № 8, С. 261-271, available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs\\_2007\\_8\\_48](http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2007_8_48)
  20. Кучук Г.А., Можасв О.О., Воробйов О.В. (2006), "Аналіз та моделі самоподібного трафіка", *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, № 9, С. 173-180, available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit\\_2006\\_9\\_35](http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2006_9_35)
  21. Haffey M., Arlitt M., Williamson C. (2018), "Modeling, Analysis, and Characterization of Periodic Traffic on a Campus Edge Network", *2018 IEEE 26th International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS)*, p. 170-182.
  22. Kirichenko L., Radivilova T., Bulakh V. (2018), "Machine Learning in Classification Time Series with Fractal Properties", available at: [https://www.researchgate.net/publication/329973801\\_Machine\\_Learning\\_in\\_Classification\\_Time](https://www.researchgate.net/publication/329973801_Machine_Learning_in_Classification_Time).
  23. Drieieva H., Smirnov O., Polishchuk Y., Brzhanov R., Aleksander M. (2020), "Method of Fractal Traffic Generation by a Model of Generator on the Graph", *COAPSN, CEUR-WS*, Vol . 2616, Lviv, Ukraine, available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2616/paper31.pdf>
  24. Drieieva H., Drieiev O., Meleshko Ye., Yakymenko M., Mikhav V. (2022), "A Method of Determining the Fractal Dimension of Network Traffic by Its Probabilistic Properties and Experimental Research of the Quality of This Method", *CEUR-WS*, Vol. 3171, Gliwice, Poland, P. 1694-1707, available at: <http://ceur-ws.org/Vol-3171/paper120.pdf>

Received (Надійшла) 07.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.11.2022

### A method of simulation of computer network traffic with fractal properties

H. Drieieva

**Abstract.** The goal of this work is to create a method of simulating computer network traffic with fractal properties for testing network algorithms and protocols. The object of research is the process of simulation modeling of network traffic. The subject of research is the methods and algorithms for modeling time series with fractal properties. Nowadays, mathematical models of self-similar time series are used for the mathematical description of telecommunication processes. In most cases, for self-similar traffic, predicting parameters based on the quality of QoS service, analytical expressions cannot be constructed, or such transformations can be constructed for too specific situations, so mostly analytical calculations are impractical. For this reason, to determine the main indicators of the quality of service, such as jitter, delay, average number of failures, and others, simulation modeling using self-similar traffic generators is used. This leads to the need for computationally simple generators of self-similar traffic with controlled fractal properties, which would give numerical sequences with properties as close as possible to the properties of the real traffic of the telecommunication network under investigation. In this paper, a method of simulation modeling of computer network traffic with fractal properties is proposed. The theory of fractal analysis and the theory of Markov processes were used to generate traffic. This method can be part of a software simulation model of a computer network, which in turn can be used for testing network algorithms and protocols. Also a developed simulation model of network traffic is planned to be used in the future for testing the quality of methods for determining the fractal dimension of time series, as well as for forecasting the load of network devices in computer networks.

**Keywords:** computer networks, network traffic, fractal dimension, Markov processes, simulation modeling, computer simulation model.

Є. О. Канарський, О. О. Орехов, А. О. Стадник

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

## ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ СИСТЕМ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ: АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ

**Анотація.** Завдяки стрімкому розповсюдженню технології доповненої реальності в різних сферах людської діяльності постало питання оцінки якості цих систем. Хоч дослідження в цьому напрямку вже проводились, але вони охоплювали окремі показники якості і не пропонували єдину комплексну модель. Для оцінки якості систем доповненої реальності використовувався стандарт ISO-25010. Але даний стандарт не враховує особливі відмінності систем і додатків доповненої реальності, що робить дослідження для даного напрямку надзвичайно актуальними. Метою даної статті є огляд і систематизація існуючих публікацій на тему дослідження якості доповненої реальності для визначення поточних результатів та актуальних напрямків досліджень для подальшого використання при розробці моделей та метричних методів оцінки якості систем доповненої реальності. В ході проведення огляду було встановлено, що найбільша кількість досліджень присвячена якості використання доповненої реальності та користувацькому досвіду використання таких систем. В більшості випадків пропонується проводити оцінку за допомогою методу евристичного. Також є спроби розробки метрик на основі існуючих стандартів якості для програмних систем або модернізувати існуючі моделі оцінки. Пропозиції щодо розробки окремих метричних методів оцінки систем доповненої реальності відсутні або знаходяться в закритому доступі. На основі отриманих результатів огляду можна зробити висновок, що при розробці моделей і метрик оцінки якості систем доповненої реальності потрібно буде враховувати такі характеристики як якість використання, якість досвіду користувача та візуальну привабливість. Даний перелік планується доповнити після проведення більш глибокого огляду існуючих досліджень.

**Ключові слова:** доповнена реальність, моделі якості, метрики, досвід користувача, якість використання.

### Вступ

**Мотивація.** Доповнена реальність (англ. Augmented Reality, AR) – це технологія, що дозволяє інтегрувати віртуальні об'єкти у оточуючу нас реальність. Іноді як синоніми використовуються назви розширена реальність, поліпшена реальність, збагачена реальність. Вперше цей термін був запропонований у 1992 році інженером Томом Коделлом. Дослідник Рональд Азума в 1997 році визначав доповнену реальність як систему, що [1]:

- поєднує віртуальне і реальне;
- взаємодіє в реальному часі;
- працює в 3D.

Раніше за нього у 1994 Пол Мілграм та Фуміо Кішино описували доповнену реальність як частину змішаної реальності (MR) [2]. Точніше, вони позначають доповнену реальність як частину реально-віртуального континууму, який з'єднує повністю реальне середовище з віртуальним (рис. 1).

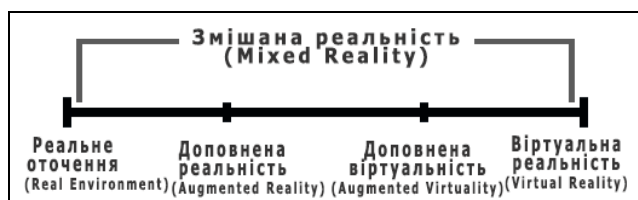


Рис. 1. Реально-віртуальний континуум

Хоч технологія доповненої реальності отримала широке поширення та почала активно розвиватись у різних сферах відносно недавно, сама технологія не є новою. Перше практичне використання доповнена реальність знайшла ще в 80-х роках минулого століття. Разом з початком використання AR-технологій постало питання про методи для оцінки якості таких

систем. В наш час, коли доповнена реальність отримала значний розвиток у зв'язку з поширенням мобільних пристроїв, це питання стало ще більш актуальним.

Головною відмінністю систем доповненої реальності від «традиційних» програмних продуктів являється інтерфейс. На відміну від таких звичних елементів керування, як кнопки та повзунки тощо, AR-системи використовують інші способи забезпечення можливості взаємодії користувача з віртуальними елементами. Саме на цю особливість робиться акцент при дослідженні проблематики оцінки якості доповненої реальності та інших складових змішаної реальності.

**Аналіз публікацій.** Переважна більшість публікацій присвячена дослідженню якості використання систем доповненої реальності як самостійного явища або частини змішаної реальності [3-21]. Розглядаються різні методики оцінки – від опитувань потенційних користувачів до евристичного аналізу. Також почалось дослідження досвіду користувача та його впливу на якість AR-системи [22-24]. В останні кілька років також стала актуальною розробка моделей якості, в тому числі на основі вже існуючих стандартів [25-27]. Велика кількість досліджень призначена для оцінки якості системи доповненої реальності в межах конкретної предметної області або специфічної задачі [28-34]. Також дослідження в даній і суміжній з нею областях проводить кафедра комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» [35,36].

**Метою дослідження** являється огляд існуючих публікацій для формування уявлення про поточний стан та актуальні напрямки розробок методик і методів оцінювання якості систем доповненої реальності.

## Виклад основного матеріалу

**Якість використання.** Більша частина досліджень оцінки якості доповненої реальності присвячена якості використання (англ. usability) AR-систем, особливо інтерфейсу користувача. Перші дослідження стосувалися оцінки якості використання віртуальних середовищ в цілому і представляли собою просте опитування користувачів віртуальної або доповненої реальності. При цьому відзначалися поширені проблеми, пов'язані зі зручністю використання та уявленням користувачів про роботу системи [3]:

- оманливі ознаки дій;
- очікування дії, яка неможлива;
- прихований функціонал;
- відсутній або неоднозначний зворотній зв'язок.

У дослідженні ці проблеми пов'язують з розташуванням елементів інтерфейсу та сприйняттям користувачами елементів змішаної реальності для орієнтування у віртуальному просторі. Хоч дана робота не пропонує власних методів оцінки якості систем доповненої реальності, вона позначила їх основні проблеми та стала основою для подальших досліджень. Одним з таких результатів став представлений у роботі [4] покроковий метод оцінювання (WEM). Даний метод являється вдосконаленою покроковою перевіркою на відповідність до поставлених вимог і включає наступні основні кроки:

- підготовка сценаріїв та контрольних списків для користувачів;
- проходження кожного сценарію з використання відповідних моделей;
- критика дизайну системи;
- реєстрація виявлених проблем;
- об'єднання проблем, виявлених в кожному сценарії, в загальних список;
- розстановка пріоритетів вирішення проблем на основі суб'єктивної оцінки.

Такий метод доволі простий у реалізації та дозволяє залучати до оцінки usability персонал без відповідної кваліфікації. Для підвищення точності отримуваних результатів пропонується повторний аналіз з більшою кількістю оцінювачів. За результатами перевірки, WEM може правильно визначити до 80,4% спостережуваних проблем. Упущені проблеми переважно пов'язані з труднощами навігації і не являються критичними.

Загалом таких методів для оцінки якості використання віртуального середовища було створено досить багато. Їх класифікація стала предметом окремого дослідження (рис. 2) [5].

Проте, не зважаючи на великий перелік доступних методів та їх ефективність при проведенні аналізу, залишалась актуальною потреба в більш економічно-ефективних методах інженерії якості використання [6] і адаптація їх до майбутніх вимог галузі [7].

Відокремлювати змішану реальність від віртуального середовища як самостійне явище для аналізу якості використання стали лише на початку XXI століття [8]. Одним з перших адаптованих до оцінки доповненої реальності методів став метод аналізу домену [9].

		Залучення користувачів		Кількість	Тип результату
		Потребує	Не потребує		
Контекст оцінювання	Загальні	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Формальне підсумкове оцінювання</li> <li>•Post-hoc опитування</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Загальні моделі продуктивності для віртуальних середовищ</li> </ul>	Кількісний	Якісний
		<ul style="list-style-type: none"> <li>•Неформальне підсумкове оцінювання</li> <li>•Post-hoc опитування</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Евристичний аналіз</li> </ul>	Кількісний	
	Для конкретних застосувань	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Формальне оцінювання</li> <li>•Формальне підсумкове оцінювання</li> <li>•Post-hoc опитування</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Моделі продуктивності для конкретних програм віртуальних середовищ</li> </ul>	Кількісний	Якісний
		<ul style="list-style-type: none"> <li>•Формальне оцінювання (формальне і неформальне)</li> <li>•Post-hoc Опитування</li> <li>•Інтерв'ю</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Евристичний аналіз</li> <li>•Когнітивний покроковий метод</li> </ul>	Якісний	

**Рис. 2.** Класифікація методів дослідження якості використання віртуальних середовищ

Запропонований процес аналізу складається з чотирьох основних дій:

- розробка варіантів використання – варіанти використання описують випадки використання, для яких призначена система;
- профілі користувачів – дозволяє інженерам зосередити зусилля на проектуванні для певної цільової групи;
- аналіз потреб користувачів – уточнює потреби користувачів та дає аналіз необхідних можливостей;
- аналіз завдань користувача – використовує набір методів для декомпозиції завдань користувачів та розуміння набору процедур, які користувач використовує для досягнення мети. Цей аналіз корисний для встановлення показників ефективності, призначення цільових значень для метрик, визначення потенційних помилок та перевірки відповідності інтерфейсу до потреб користувача.

Дане дослідження стало першим випадком використання орієнтованого на користувача процесу проектування до AR-систем. Також існують методи з використанням підтримки комп'ютера [10]:

- I-DOVE (Interactive tool for Development Of Virtual Environment) – заснований на кількох наборах рекомендацій для розробки Virtual Environment;
- MAUVE – багатокритеріальна usability матриця для отримання рекомендацій щодо навігації, взаємодії з об'єктами, дизайну тощо;
- Гіпертекстовий прототип – інструмент для підтримки при проектуванні інтерфейсів віртуальних середовищ. Містить 45 загальних властивостей дизайну, які необхідні для нормального інтерфейсу.

Окрім комп'ютеризованих засобів також існують інші методи оцінки, основані на залученні користувачів до процесу розробки [11]:

- Польове спостереження – складається зі спостереження за користувачем та збором інформації про його поведінку та результати діяльності при виконанні поставлених завдань. Дослідження проводиться в робочому середовищі користувача. Дослідник має спостерігати за робочим процесом та робити записи, на основі яких ставиться оцінка;
- Інтерв'ю – метод виявлення потреб та індивідуальних проблем потенційних користувачів за допомогою інтерв'ю;



– Анкетування – застосовується командою дизайнерів для з'ясування, як розроблювана система буде використовуватись певною групою користувачів;

– Аналіз контексту використання – описує відповідні характеристики користувача (ISO 9421-11). Включає описи користувача, виконувани завдання, використовуване обладнання та робоче середовище. Ця інформація має важливе значення для розробки інших методів оцінки якості використання;

– Збори вимог – виконується після аналізу контексту використання для аналізу результатів;

– Експертна оцінка за критеріями – оцінювання експерта на основі заздалегідь встановлених критеріїв;

– Оцінка зручності використання – у тестуванні бере участь група користувачів, яка має виконувати невеликі завдання на основі підготовлених коротких сценаріїв. Після виконання завдань проводиться інтерв'ю і заповнюється анкета;

– Діаграма спорідненості – простий і економічно ефективний метод сортування великих обсягів даних. Використовується для групування різних вимог користувачів.

Дані методики існують вже давно і не забезпечують високу точність результатів, але все ще залишаються актуальними через свою простоту використання.

Повноцінне дослідження якості систем доповненої реальності почалося з 2007 року, коли мобільні пристрої стали досить поширеними. Саме мобільні пристрої стали платформою для розповсюдження AR-систем за межами спеціально обладнаних робочих місць. У роботі [12] пропонується методологія оцінювання якості використання для прототипу AR-бінокюляра PRISMA. Предметом оцінки названо поведінку користувача з новими туристичними технологіями. Оцінювання проводиться за кількісними і якісними показниками. Основними цілями кількісного аналізу являється оцінювання поведінки та підтвердження доданої вартості учасниками тестування. Аналіз проводився на основі анкети із 30 запитань, заповнених одразу після використання прототипу. Якісний аналіз збирає дані за допомогою методів безпосереднього спостереження, інтерв'ю та дослідження письмових документів. Його метою є визначення потреб і бажань користувачів подібних туристичних AR-систем. Такий підхід до оцінювання якості використання може вказати на основні недоліки системи та дати підказки для подальшого вдосконалення. В опитуваннях часто беруть участь зацікавлені представники відповідної сфери, що впливає на результати. Проте оцінювання проходить на основі відгуків фокус-групи з невеликою кількістю учасників, а залучати більше людей не дозволяє потік користувачів на тестовій локації. Такі результати не можна назвати об'єктивними або точними, але такий метод тестування залишається актуальним завдяки простоті та швидкості отримання результатів.

Більш комплексне дослідження викладено в роботі [13]. Головною метою дослідження являється розробка методу інженерії якості використання, орієнтованого на користувачів та включення його у життєвий цикл розробки. Таким чином пропонується

поліпшити дизайн інтерфейсу додатків доповненої реальності. Як і в роботі [12], тут використовуються дослідження поведінки користувачів, проте результати додатково підкріплені розрахунками кореляції, впливу стилів тексту та алгоритмів малювання на помилку. Також до уваги було взято проблеми з освітленням, налаштування та інші фактори, що впливали на користувача. В результаті був використаний той самий метод опитування користувачів, але завдяки додатковим розрахункам результати можна вважати більш валідними. Проблемою дослідження являється те, що воно направлено на дослідження активних стилів малювання для доповненої реальності. Сучасні AR-системи не обмежуються текстовими даними, тому потрібні додаткові дослідження і розрахунки, без яких робота являється застарілою.

Схожі тези можна побачити в публікації [14] від 2009 року. Розглядаючи методи опитування, перевірки та тестування для оцінки якості використання AR-інтерфейсів, автор відзначає необхідність враховувати відмінність доповненої реальності від інших систем. Характеристика методів перевірки та опитування відповідають тим, що описані в дослідженнях [12] і [13] відповідно. Метод тестування описується як основний метод оцінки якості використання для систем доповненої реальності, але за описом він майже ідентичний до методу перевірки і не має прикладів використання.

Однак дослідження якості використання не обмежується стандартизованими опитуваннями. Для організації, стурбованих покращенням взаємодії з користувачами, відстеження та вимірювання якості використання є постійною проблемою. Вирішенням проблеми стандартизації usability займається в тому числі IT-відділ компанії Intel [15]. Для стандартизації була обрана п'ятибальна шкала Лайкерта – так звана шкала зручності використання системи (SUS). Однак просто адаптувати SUS для роботи з доповненою реальністю виявилось неможливим, тому було прийнято рішення пов'язати пул потенційних елементів зі стандартом ISO 9241-11. Загалом було розроблено 12 потенційних пунктів, за якими повинна проводитись оцінювання. Всі пункти були поділені на три категорії – ефективність, результативність (дієвість) і задоволеність (табл. 1).

Після декількох раундів тестувань, була проведена кореляція показників. Були внесені значні зміни для покращення балансу та усунення плутанини з елементами (табл. 2).

Отримані метрики якості використання для користувацького досвіду було визнано як надійною, валідною та чутливою альтернативою традиційної шкали SUS. Самі автори досліджень відзначають компактний розмір отриманих метрик та потенційну можливість використовувати їх в інших етапах життєвого циклу. Разом з тим відзначається високий рівень кореляції між показниками. Проте компактність описаних в роботі [15] метрик не дає всебічну оцінку досліджуваної системи, а лише спирається на суб'єктивну оцінку користувачів та їх власний досвід. Результати дослідження можна використати для подальших розробок в напрямку оцінки якості використання.

Таблиця 1 – Використані потенційні елементи

Компоненти usability	Потенційні елементи
Ефективність	[Цей елемент] зберігає мені час
	Я схильний до помилок [в цій системі]
	Я не роблю помилок [з цією системою]
Дієвість	Я маю витратити багато часу на виправлення [з цією системою]
	[Ця система] дозволяє мені виконувати мої завдання
	Для моїх завдань мені потрібна система з більшою кількістю функцій
	Мені не потрібні доповнення [для цієї системи]
Задоволеність	Можливості [цієї системи] не відповідають моїм вимогам
	Я задоволений [цією системою]
	Я краще користувався б чимось іншим замість [цієї системи]
	Маючи вибір, я обрав би [цю систему] замість інших
	Використання [цієї системи] було розчаруванням

Таблиця 2 – Компоненти usability

Компонент usability	Потенційні елементи
Дієвість	Можливості [цієї системи] відповідає моїм вимогам
Задоволеність	Використання [цієї системи] викликає розчарування
Загальність	[Ця система] легка у використанні
Ефективність	Я витрачаю багато часу на виправлення помилок [в цій системі]

Для оцінки систем доповненої реальності можна використовувати SUS без додаткових модифікацій. У дослідженні [16] оцінюється розроблена інтерактивна AR-система для навчання стосовно збереження риб на Тайвані. У частині оцінки системи в основному оцінювалась якість використання системи з точки зору кінцевого користувача. Саме опитування складається з 10 питань, які оцінюються за 5-бальною шкалою:

- Я вважаю, що хочу використовувати цю систему частіше;
- Я вважаю, що система надто складна;
- Я вважаю, що система проста ц використанні;
- Я вважаю, що мені знадобиться технічна підтримка для використання цієї системи;
- Я вважаю, що окремі функції цієї системи добре інтегровані;
- Я вважаю, що в цій системі багато суперечностей;
- Я вважаю, що більшість людей швидко навчяться користуватись цією системою;
- Я вважаю, що система дуже громіздка для використання;
- Я вважаю, що відчуваю себе дуже впевнено при користуванні системою;
- Я вважаю, що мені потрібно багато чому навчитися для роботи з цією системою.

Анкета заповнюється учасниками опитування після завершення роботи з досліджуваною системою, після чого розраховується середній бал та медіана. Для розглянутої роботи ці значення становлять 78 і 66 балів відповідно, що вказує на придатність системи до використання. Учасники опитування також відмітили зручність використання системи. Загалом можна сказати, що SUS відноситься до вже розглянутої методикою опитування за допомогою анкетування. Головною відмінністю SUS являється чітко визначений, сталий перелік питань. З точки зору проведення оцінки, він являється ефективним, економічним за часом та простим у використанні. Головним його мінусом являється суб'єктивність отриманих результатів.

Окрім опитувань та перевірки за допомогою метрик, популярною методикою оцінки якості використання являється евристичний метод. Його суть полягає в тому, що група експертів перевіряє дизайн інтерфейсу за допомогою набору характеристик. Евристичне оцінювання просте у виконанні, дешеве та доволі ефективне. За його допомогою не можна виявити всі проблеми, але переважна більшість основних і більшість другорядних недоліків стануть явними. Процеси перевірки якості використання за допомогою евристичної оцінки добре задокументовані і мають багато публікацій, що описують використання цих методів. Разом із ростом популярності AR-систем постало питання оцінки якості використання, в тому числі за допомогою евристичного методу. Оскільки традиційні евристики не підходять для оцінки доповненої реальності, в роботі [17] пропонується методологія створення нових евристик якості використання для кожного конкретного випадку:

- Дослідницький етап – збір бібліографічного матеріалу, конкретні програми та їх характеристики, загальні та/або пов'язані евристики;
- Описовий етап – визначення найважливіших характеристик раніше зібраних даних та формалізація основних понять;
- Кореляційний етап – визначення характеристик, які повинні мати евристики usability на основі традиційних евристик та аналізу існуючих прикладів;
- Пояснювальний етап – формальне визначення набору запропонованих евристик за допомогою стандартного шаблону;
- Етап валідації – перевірка нових евристик за допомогою експериментів, виконаних на обраних тематичних дослідженнях, доповнених користувацькими тестами;
- Етап уточнення – уточнення результатів на основі відгуків, отриманих на етапі перевірки.

Представлений алгоритм універсальний і підходить для будь-якої системи. Для перевірки його придатності в розглянутій роботі та досліджуваних greed-систем було розроблено 12 нових евристик, згрупованих у три категорії: дизайн та естетика, навігація, помилки та довідка. Результати роботи були підтримані School of Informatics Engineering of the Pontifical Catholic University of Valparaiso, членами "UseCV" Research Group та IDIS Research Group of University of Cauca. Загалом отримана таким чином евристика мають загальні для даного методу

оцінки якості використання недоліки – можна пропустити деякі малопомітні проблеми. Проте недоліки компенсуються дешевизною, швидкістю та простотою методу.

Крім вищевказаних, існує ще одна причина популярності використання евристичних досліджень. Головною платформою для додатків доповненої реальності являються смартфони та планшети. Через велику кількість способів використання AR у додатках різного призначення. Таке різноманіття ускладнює стандартизацію, тому простіше використати евристичне дослідження. У дослідженні [18] розглядаються принципи якості використання для AR-додатків на смартфоні. Метою дослідження стала розробка принципів якості використання для розробки та оцінки мобільних додатків. Розробка проводилась на основі аналізу існуючих досліджень методів евристичної оцінки, принципів проектування систем доповненої реальності, вказівок щодо інтерфейсів портативних мобільних пристроїв і принципів зручності використання матеріального інтерфейсу користувача. В результаті було розроблено 22 принципи, що були розділені на п'ять різних груп (рис. 3).

Детально розроблені принципи usability описані в табл. 3. На основі отриманих результатів було проведено дослідження декількох мобільних додатків на операційній системі Android.

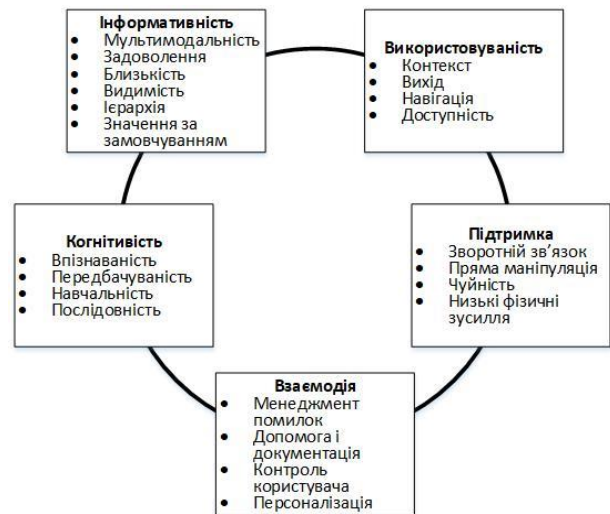


Рис. 3. Структуровані принципи usability

Таблиця 3 – Принципи usability для оцінки та розробки додатків доповненої реальності

Принципи		Визначення
Информативність	Значення а замовчуванням	Початок роботи повинен бути легким для користувача. Також повинна надаватись рамка, що позначає простір введення і пов'язані з ним екземпляри
	Задоволення	Естетичний дизайн, в тому числі палітра кольорів, повинен справляти захоплююче враження на користувача
Информативність	Близькість	Слід використовувати не лише знайомі метафори та значки, а й орієнтовану на користувача мову.
	Ієрархія	Якщо обсяг інформації великий, вона має подаватись поетапно
	Мультимодальність	Інформація має надаватись зі звуком та візуальним відображенням
	Видимість	Графічні фактори мають мати належний дизайн.
Когнітивність	Послідовність	Загальноживані терміни та інтерфейси повинні йти послідовно, щоб уникнути плутанини.
	Навчальність	Функції та особливості програми мають бути легкими для вивчення
	Передбачуваність	Функції та особливості програми мають бути легкими для вивчення.
	Впізнаваність	Необхідну інформацію слід надавати належним чином, щоб користувачам не довелося використовувати короточасну пам'ять
Підтримка	Менеджмент помилок	Помилки, що виникають під час використання програм, повинні бути підкріплені методом запобігання та вирішення
	Допомога і документація	Необхідно надати відповідну довідку для підтримки програм користувача
	Персоналізація	Інтерфейс має бути досить простим, щоб його можна було змінювати відповідно до смаків і особливостей користувачів.
	Контроль користувача	У користувачів має бути відчуття, що вони контролюють систему, а система реагує на їхні дії
Взаємодія	Пряма маніпуляція	Коли користувачі керують пристроєм, інформація, що з'являється на екрані, і дії користувачів повинні інтуїтивно співставлятися
	Зворотній зв'язок	Користувачам повинна надаватись інформація про послідовність процесу та стан системи
	Низькі фізичні зусилля	Зусилля, пов'язані з роботою програми, мають бути мінімізовані
	Чуйність	Реакція на дії користувачів має бути швидкою
Використовуваність	Доступність	Програма повинна швидко починати роботу, а попередній робочий стан і параметри повинні залишатися незмінними після повторного запуску.
	Контекст використання	Інтерфейс користувача має бути розроблений з урахуванням різних типів середовищ і розроблений відповідно до середовища використання
	Вихід	Припинити роботу або повернутися до попередньої частини роботи має бути легко
	Навігація	Користувачам слід дозволити вільну навігацію в додатку, коли вони виконують свою роботу

Оскільки тестування проводилось в лабораторних умовах, результати тестування із залученням користувачів можуть відрізнятись. При спробі розробити аналоги до вже існуючих додатків з використанням отриманих рекомендацій, показники якості використання вдалось покращити. Таким чином було підтверджено валідність результатів даного дослідження. Слід враховувати, що дане дослідження було обмежене трьома мобільними застосунками, використовуваними лише на території Кореї. Тестування проходило в лабораторних умовах на смартфонах Android, тож на iOS результати не перевірялись. При дослідженні використовувались дисплеї стаціонарних смартфонів, тож масштабування інтерфейсу не біло враховане.

Також розробці евристик для систем доповненої реальності присвячена робота [19]. У дослідженні проводиться розробка набору універсальних евристик для оцінки якості використання AR не тільки на мобільних, а й на спеціалізованих гаджетах і платформах. У своїй роботі автор проводить дослідження методів евристичної оцінки та їх застосування при тестуванні додатків доповненої реальності, а також модифікує деякі вже відомі. В результаті ним було запропоновано список з шести евристик для оцінки AR-додатків, а саме:

- Методи взаємодії та контроль;
- Презентація віртуальних об'єктів;
- Зв'язок між віртуальними об'єктами і реальним світом;
- Інформація, пов'язана з віртуальними об'єктами;
- Придатність і контексті використання;
- Фізичний контроль використання.

Даний список представляє собою універсальний набір на основі повторюваних і частих проблем, що зустрічаються при роботі з доповненою реальністю, тому їх можна назвати універсальними. Однак така універсальність не гарантує точність результатів оцінки. При розробці евристик для кожного конкретного випадку, їх перелік може становити кілька десятків. Це добре видно на прикладі двох попередніх розглянутих публікацій. Тому автор даної роботи пропонує під час евристичного аналізу також використовувати інші евристики, наприклад такі як запропоновані Якобом Нільсеном. Також автор не проводив перевірку отриманих результатів на практиці, тому при використанні даний набір евристик може потребувати корегувань в кожному окремому випадку.

В останніх публікаціях чітко можна побачити наступну тенденцію: не просто досліджуються та пропонуються методи оцінки якості використання AR-застосунків, а й враховуються сфера їх застосування. Наприклад, роботи [20] і [21] присвячені дослідженню принципів якості використання у додатках доповненої реальності для дітей дошкільного віку та організації освітнього процесу відповідно. Ці два дослідження проводились різними групами з різних університетів з різницею у два роки, але їх структура майже ідентична. Першим кроком досліджується наявна література. Крім загальних понять та методів оцінки якості використання, описуються та зводяться

у таблицю характерні проблеми, з якими стикаються діти або студенти. Отримані результати використовуються для розробки принципів якості використання, з яких видаляються дублікати і комбінуються схожі. Після видалення і об'єднання дублікатів, визначені принципи діляться на групи та проводиться аналіз головних компонентів. Нарешті, в результаті аналізу були отримані 23 окремих принципи якості використання для розробки AR-додатків для дітей дошкільного віку у роботі [20] та навчання студентів у роботі [21]. На основі отриманих принципів якості використання автори досліджень планують провести розробку застосунків та використати їх для проведення евристичного аналізу.

**Користувацький досвід.** Окрім якості використання, існують інші методи оцінки якості систем доповненої реальності. Оскільки такі сервіси пропонують новий вид взаємодії, для забезпечення успіху їм також потрібно розуміти очікування і потреби майбутніх користувачів. Оцінювання цих факторів та їх вплив на якість AR-систем здійснюється за допомогою дослідження досвіду користувача (англ. User Experience, UX).

Як і у випадку з дослідженням якості використання, у перших дослідженнях використовувався метод інтерв'ю для розуміння уявлень та вимог потенційних користувачів до AR-систем. У роботі [22] проводиться опитування та систематизація отриманих результатів для різних областей застосування. Опитуваними стали відвідувачі в торгових центрах, оскільки там завжди багато відвідувачів, розміщуються різноманітні магазини та проводяться розважальні заходи. На відміну від більшості подібних досліджень, дана робота не розглядає системи доповненої реальності в рамках конкретної предметної області. Натомість в роботі досліджуються ставлення користувачів до AR-систем, уявлення про їх роботу та загальне відношення до використання технологій та обміну інформацією. Автори пояснюють такий вибір напрямку досліджень тим, що вивчення UX на момент написання статті знаходяться ще в початковому стані, а також пошуком можливість виділити специфічні для AR характеристики UX. Наступним кроком досліджень автори називають розробку конкретних показників для оцінки AR-систем на основі теорій і концепцій UX.

Більш розгорнуто результати даного дослідження та концепції UX в цілому представлено в дисертації [23] все того ж автора. Окрім методу інтерв'ю, використаного в роботі [22], в дисертації для збору інформації про потреби і очікування потенційних користувачів використовуються результати онлайн-опитувань. Завдяки отриманим відповідям автор отримав уявлення про те, який досвід користувачі очікують отримати від користування додатками доповненої реальності, та систематизувати очікуваний UX за наступними категоріями:

- Інструментальний – базується на цінності технології для користувача в якості інструменту для полегшення діяльності;
- Когнітивний – пов'язаний з думками та можливістю AR-сервісу задовольняти потреби користувачів у нових знаннях;

– Емоціональний – пов'язаний з можливістю AR-сервісу викликати в користувача таку емоційну реакцію (задоволення, радість, захоплення, емоційне збудження, ностальгія);

– Сенсорний – впливає на сприйняття користувачем оточуючого середовища та інтерактивність, залежить від здатності AR-системи впливати на естетичні почуття;

– Соціальний – виникає при взаємодії користувача з людиною, безпосередньо пов'язаною з тою ж AR-системою;

– Мотиваційний – стимулює користувача досягти якоїсь мети за допомогою технології.

Даний перелік описує досвід, до якого прагнуть досліджені та потенційні користувачі AR-системи. Відповідно, розробники при проектуванні мають це враховувати і намагаться зробити такий досвід можливим. Але UX, не охоплює всього, що слід враховувати при проектуванні і не може прогнозувати реальний досвід, отримуваний користувачами в процесі роботи. У висновках до дисертації автор зазначає, що використання UX в конкретних областях являється складною задачею. Люди часто мають абстрактні або узагальнені потреби та очікування від роботи з доповненою реальністю, які можна віднести і до інших складових змішаної реальності. Така відсутність конкретики теоретично може підштовхнути до більш розширених досліджень UX. В подальшому дана дисертація стала основою для дослідження автором концепції та суб'єктивних показників оцінки UX мобільних систем доповненої реальності.

В останніх дослідженнях UX розглядається більш комплексно. Якщо в попередніх дослідженнях розглядався виключно сприйняття і реакція користувачів на використання систем доповненої реальності, то в сучасних дослідженнях також беруться до уваги сторонні фактори, що можуть вплинути на користувачський досвід. В роботі [24] пропонується цілісна концептуальна модель UX з 10 компонентів (рис.4), вилучених із вже існуючих моделей – UXIVE Model.

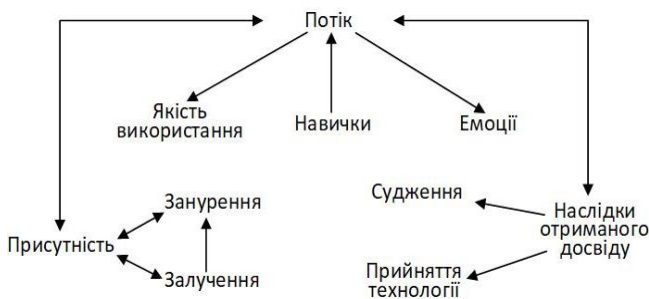


Рис. 4. Модель UXIVE

Модель UXIVE описує компоненти, з яких формується UX, та відношення між ними. Результати підкріплюються результатами опитування більш ніж 150 користувачів AR-систем. Автори справедливо зазначають, що отримані результати не являються абсолютно точними, оскільки в опитуванні брали участь обмежена кількість користувачів однієї AR-системи, половина з яких належить до однієї вікової групи. Але навіть з переліченими недоліками, дане

дослідження являється першим, де вивчаються взаємозв'язки компонентів UX між собою, їх вплив на користувача і розвиток технологій доповненої реальності.

**Моделі оцінки якості.** На даний момент не існує ніяких загальноприйнятих моделей для комплексної оцінки якості систем доповненої реальності. Частково це пов'язано з тим, що доповнена реальність тільки починає масово розповсюджуватись. В зв'язку з цим постало питання про оцінку якості таких систем. На даний момент для оцінки якості AR-систем використовуються моделі якості на основі стандарту ISO-25010, метрики якого адаптуються під функції доповненої реальності [25]. Інші дослідження оцінюють якість систем AR на основі їх візуальної складової – якості зображення та естетичної привабливості. Моделі оцінки впливу візуальної якості [26] та оцінки якості накладених зображень [27] демонструють значення візуальної складової на задоволеність користувачів від використання AR. Однак вони обмежені візуальною складовою, тоді як на якість AR-систем впливають декілька різних показників.

**Інші дослідження.** Крім розглянутих вище, існує ще велика кількість досліджень, пов'язаних з різними аспектами якості доповненої реальності. Ці публікації поєднують кілька напрямків досліджень або розглядають проблему під незвичним кутом, тому їх важко систематизувати. В них розглядаються такі питання, як моделі прийняття доповненої реальності [28], оцінка намірів користувачів при використанні мобільних додатків [29], розробка рекомендацій для навчальних AR-систем [30], оцінювання систем з точки зору користувачів [31,32], принципи та метрики для розробки дизайну AR-додатків [33,34], експериментальні дослідження в туризмі та інших сферах застосування доповненої реальності. Також сюди можна віднести дослідження якості використання інтерактивних програмних засобів [35] і якість людино-машинних інтерфейсів [36].

## Висновки та подальші дослідження

В дані статті проводиться огляд існуючих публікацій на тему оцінки якості доповненої реальності. Публікації можна систематизувати за напрямками досліджень. Найбільша кількість досліджень присвячена якості використання, оскільки за допомогою цього показника найлегше оцінити привабливість для користувача розроблюваного програмного продукту. Частіше всього для проведення оцінювання використовується метод евристичного дослідження. Такий вибір методики оцінки зумовлений тим, що якість використання являється суб'єктивною характеристикою і використання такого ж суб'єктивного методу оцінки здається логічним. На даний момент можна помітити що дослідження якості використання проходять в двох напрямках – перший зосереджений на визначенні універсальних евристик для будь-яких AR-додатків, другий передбачає розробку окремого набору евристик для кожної предметної області або окремого випадку. При цьому у другому випадку для покращення результатів оцінки часто додатково застосовуються універсальні евритики.

Також usability являється важливою складовою інших досліджень якості AR, таких як користувацький досвід або моделі на основі стандарту якості програмного забезпечення ISO-25010. Можна сказати, що якість використання являється ключовим параметром оцінки якості доповненої реальності, який доповнює інші параметри якості. Таким чином цей показник стане об'єднуючим при об'єднанні актуальних досліджень UX та вже існуючих метрик якості програмного забезпечення в єдину модель якості систем доповненої реальності. На даний момент дослідження та створення моделей якості для систем

доповненої реальності знаходиться на початковому етапі, тому публікацій не цю тему майже немає. Це в значній мірі пов'язано з тим, що AR лише відносно нещодавно почали масово поширювати на смартфонах. AR-технології все частіше зустрічаються в нашому повсякденному житті, тому тема розробки моделей і метрик оцінки якості доповненої реальності являється актуальною і важливою. В майбутніх роботах планується провести більш детальний аналіз існуючих публікацій та визначити основні параметри і показники, на яких базуватиметься модель якості доповненої реальності.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Azuma R. T. A Survey of Augmented Reality [Electronic resource] / Ronald T. Azuma // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. – 1997. – Vol. 6, no. 4. – P. 355-385. – DOI: <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
2. Milgram P. A Taxonomy Of Mixed Reality Visual Displays [Electronic resource] / Paul Milgram, Fumio Kishino // IEICE Transactions on Information Systems. – 1994. – E77D, no. 12. – P. 1321–1329. – Mode of access: <https://cs.gmu.edu/~zduric/cs499/Readings/r76jBo-Milgram IEICE 1994.pdf>
3. Kaur K. Designing virtual environments for usability [Electronic resource] : Electronic Thesis or Dissertation / Kaur Kulwinder. – [S. l.], 1998. – Mode of access: <http://openaccess.city.ac.uk/7567/>
4. Sutcliffe A. G. Evaluating the usability of virtual reality user interfaces [Electronic resource] / A. G. Sutcliffe, K. Deol Kaur // Behaviour & Information Technology. – 2000. – Vol. 19, no. 6. – P. 415-426. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/014492900750052679>
5. Bowman D. A. A Survey of Usability Evaluation in Virtual Environments: Classification and Comparison of Methods [Electronic resource] / Doug A. Bowman, Joseph L. Gabbard, Deborah Hix // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. – 2002. – Vol. 11, no. 4. – P. 404-424. – DOI: <https://doi.org/10.1162/105474602760204309>
6. Gabbard J. L. Usability Engineering of Virtual Environments [Electronic resource] / Joseph L. Gabbard, Deborah Hix // Handbook of Virtual Environments (1<sup>st</sup> Edition). – Boca Raton, CRC Press, 2002. – P. 681-699. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780585399102>
7. Tromp J. G. Systematic Usability Evaluation and Design Issues for Collaborative Virtual Environments [Electronic resource] / Jolanda G. Tromp, Anthony Steed, John R. Wilson // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. – 2003. – Vol. 12, no. 3. – P. 241–267. – DOI: <https://doi.org/10.1162/105474603765879512>
8. Gabbard J. L. Researching Usability Design and Evaluation Guidelines for Augmented Reality (AR) Systems [Electronic resource] / Joseph L. Gabbard. – Mode of access: [https://www.rkriz.net/sv/classes/ESM4714/Student\\_Proj/class00/gabbard/index.html](https://www.rkriz.net/sv/classes/ESM4714/Student_Proj/class00/gabbard/index.html)
9. Usability engineering: domain analysis activities for augmented-reality systems [Electronic resource] / Joseph Gabbard [et al.] // Electronic Imaging 2002, San Jose, CA / ed. by A. J. Woods [et al.]. – [S. l.], 2002. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.468073>
10. Bach C. Obstacles and Perspectives for Evaluating Mixed Reality Usability [Electronic resource] / Cédric Bach, Dominique L. Scapin // ResearchGate. – Mode of access: [https://www.researchgate.net/publication/221104007\\_Obstacles\\_and\\_Perspectives\\_for\\_Evaluating\\_Mixed\\_Reality\\_Usability](https://www.researchgate.net/publication/221104007_Obstacles_and_Perspectives_for_Evaluating_Mixed_Reality_Usability)
11. Träskbäck M. User requirements and usability of mixed reality applications [Electronic resource] : Licentiate thesis / Träskbäck Marjaana. – Helsinki, 2004. – 109 p. – Mode of access: <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/48/urn012717.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
12. Alzua-Sorzabal A. An Experimental Usability Study for Augmented Reality Technologies in the Tourist Sector [Electronic resource] / Aurrene Alzua-Sorzabal, María Teresa Linaza, Marina Abad // Information and Communication Technologies in Tourism 2007. – Vienna. – P. 231-242. – DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-211-69566-1\\_22](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-211-69566-1_22)
13. Gabbard J. L. Usability Engineering for Augmented Reality: Employing User-Based Studies to Inform Design [Electronic resource] / J. L. Gabbard, J. E. Swan // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2008. – Vol. 14, no. 3. – P. 513-525. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TVCG.2008.24>
14. Kostaras N. N. Assessing the Usability of Augmented Reality Systems / Nektarios N. Kostaras, Michalis N. Xenos // 13th Panhellenic Conference on Informatics, Corfu, 10–12 September 2009. – Los Alamitos, 2009. – P. 197–201
15. Finstad K. The Usability Metric for User Experience [Electronic resource] / Kraig Finstad // Interacting with Computers. – 2010. – Vol. 22, no. 5. – P. 323-327. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.intcom.2010.04.004>
16. Lin H.-C. K. Establishment And Usability Evaluation Of An Interactive Ar Learning System On Conservation Of Fish [Electronic resource] / Hao-Chiang Koong Lin [et al.] // The Turkish Online Journal of Educational Technology. – 2011. – Vol. 10, no. 4. – P. 181–187. – Mode of access: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ946626.pdf>
17. Rusu C. A Methodology to Establish Usability Heuristics [Electronic resource] / Cristian Rusu [et al.] // The Fourth International Conference on Advances in Computer-Human Interactions, Gosier, 23–28 February 2011. – [S. l.], 2011. – P. 59–62. – Mode of access: [https://www.researchgate.net/publication/229040164\\_A\\_Methodology\\_to\\_establish\\_usability\\_heuristics](https://www.researchgate.net/publication/229040164_A_Methodology_to_establish_usability_heuristics)
18. Ko S. M. Usability Principles for Augmented Reality Applications in a Smartphone Environment [Electronic resource] / Sang Min Ko, Won Suk Chang, Yong Gu Ji // International Journal of Human-Computer Interaction. – 2013. – Vol. 29, no. 8. – P. 501-515. – DOI: <https://doi.org/10.1080/10447318.2012.722466>
19. Kalalahti J. Developing Usability Evaluation Heuristics For Augmented Reality Applications [Electronic resource] : Masters thesis / Kalalahti Joanna. – Lappeenranta, 2015. – 90 p. – Mode of access: [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/103081/masters\\_thesis\\_joanna\\_kalalahti\\_31122014.pdf?sequence=2](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/103081/masters_thesis_joanna_kalalahti_31122014.pdf?sequence=2)

20. Tuli N. Usability Principles for Augmented Reality based Kindergarten Applications [Electronic resource] / Neha Tuli, Archana Mantri // *Procedia Computer Science*. – 2020. – Vol. 172. – P. 679-687. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.05.089>
21. Al-Obaidi A. Usability Principles for Augmented Reality Applications in Education [Electronic resource] / Arwa Al-Obaidi, Master Prince // *International Journal of Computer Science and Network Security*. – 2022. – Vol. 22, no. 1. – P. 49–54. – DOI: <http://dx.doi.org/10.22937/IJCSNS.2022.22.1.8>
22. Expected user experience of mobile augmented reality services: a user study in the context of shopping centres [Electronic resource] / Thomas Olsson [et al.] // *Personal and Ubiquitous Computing*. – 2011. – Vol. 17, no. 2. – P. 287-304. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00779-011-0494-x>
23. Olsson T. User Expectations and Experiences of Mobile Augmented Reality Services [Electronic resource] / Thomas Olsson // Tampere University of Technology. – 2012. – P. 1–102. – Mode of access: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-2953-5>
24. Towards a Model of User Experience in Immersive Virtual Environments [Electronic resource] / Katy Tcha-Tokey [et al.] // *Advances in Human-Computer Interaction*. – 2018. – Vol. 2018. – P. 1–10. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/7827286>
25. Scheibmeir J. Quality Model for Testing Augmented Reality Applications [Electronic resource] / Jim Scheibmeir, Yashwant K. Malaiya // 2019 IEEE 10th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON), New York City, NY, USA, 10–12 October 2019. – [S. l.], 2019. – DOI: <https://doi.org/10.1109/UEMCON47517.2019.8992974>
26. David A. The value of visual quality and service quality to augmented reality enabled mobile shopping experience [Electronic resource] / Alsui David [et al.] // *Quality Management Journal*. – 2021. – Vol. 28, no. 3. – P. 116–127. – DOI: <https://doi.org/10.1080/10686967.2021.1920868>
27. Huiyu D. Confusing Image Quality Assessment: Towards Better Augmented Reality Experience [Electronic resource] / Duan Huiyu [et al.] // *arXiv Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2022. – P. 1–13. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.04900>
28. Leue M. C. A Theoretical Model of Augmented Reality Acceptance / M. Claudia Leue, Dario tom Dieck, Timothy Jung // Department of Food and Tourism Management Manchester Metropolitan University. – 2014. – P. 1–5. – Mode of access: [https://agrilifecdn.tamu.edu/ertr/files/2014/02/enter2014\\_RN\\_93.pdf](https://agrilifecdn.tamu.edu/ertr/files/2014/02/enter2014_RN_93.pdf)
29. Understanding users' continuance intention toward smartphone augmented reality applications [Electronic resource] / Keesung Kim [et al.] // *Information Development*. – 2014. – Vol. 32, no. 2. – P. 161–174. – DOI: <https://doi.org/10.1177/0266666914535119>
30. Towards the development of guidelines for educational evaluation of augmented reality tools [Electronic resource] / Manoela M. O. da Silva [et al.] // 2016 IEEE Virtual Reality Workshop on K-12 Embodied Learning through Virtual & Augmented Reality (KELVAR), Greenville, SC, USA, 19 March 2016. – [S. l.], 2016. – DOI: <https://doi.org/10.1109/KELVAR.2016.7563677>
31. User evaluation of mobile augmented reality scenarios [Electronic resource] / Thomas Olsson [et al.] // *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*. – 2012. – Vol. 4, no. 1. – P. 29-47. – DOI: <https://doi.org/10.3233/AIS-2011-0127>
32. Dünser A. Evaluating Augmented Reality Systems [Electronic resource] / Andreas Dünser, Mark Billinghurst // *Handbook of Augmented Reality*. – New York, NY, 2011. – P. 289-307. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0064-6\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0064-6_13)
33. Augmented Reality Design Heuristics: Designing for Dynamic Interactions [Electronic resource] / Tristan C. Endsley [et al.] // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. – 2017. – Vol. 61, no. 1. – P. 2100–2104. – DOI: <https://doi.org/10.1177/1541931213602007>
34. Graphic User Interface Design Principles for Designing Augmented Reality Applications [Electronic resource] / Afshan Ejaz [et al.] // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. – 2019. – Vol. 10, no. 2. – DOI: <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2019.0100228>
35. Орехова А.А. Качество в использовании интерактивных параллельных программных средств / А. А. Орехова, К. А. Бохан, В. С. Харченко // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – Київ, 2012. – Т. 1. – Вип. 1 (21). – С. 127-131.
36. Orechova A. Human-machine interface quality assessment techniques: Green and safety issues [Electronic resource] / Anastasiia Orechova, Oleksandr Orehov, Vyacheslav Kharchenko // *DT 2014 - 10th International Conference on Digital Technologies*. – IEEE, 2014. – P. 248-254. – DOI: <https://doi.org/10.1109/DT.2014.6868723>

Received (Надійшла) 14.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.11.2022

### Assessing the quality of an augmented reality system: an analysis of the state of research

Yevhenii Kanarskyi, Oleksandr Orehov, Anastasiia Stadnyk

**Abstract.** Due to the rapid spread of augmented reality technology in various spheres of human activity, the question of quality assessment of these systems has arisen. Although studies in this direction have already been conducted, they covered individual quality indicators and did not offer a single comprehensive model. The ISO-25010 standard was used to assess the quality of augmented reality systems. But this standard does not take into account the special differences of systems and applications of augmented reality, which makes research for this direction extremely relevant. The purpose of this article is to review and systematize existing publications on the topic of augmented reality quality research to determine current results and current research directions for further use in the development of models and metric methods for assessing the quality of augmented reality systems. During the review, it was established that the largest number of studies is devoted to the quality of using augmented reality and the user experience of using such systems. In most cases, it is suggested to conduct an assessment using the heuristic method. There are also attempts to develop metrics based on existing quality standards for software systems or to modernize existing evaluation models. Proposals for the development of separate metric methods for evaluating augmented reality systems are absent or are in closed access. Based on the results of the review, it can be concluded that when developing models and metrics for assessing the quality of augmented reality systems, it will be necessary to take into account such characteristics as the quality of use, the quality of the user experience, and visual appeal. This list is planned to be supplemented after conducting a more in-depth review of existing research.

**Keywords:** augmented reality, quality models, metrics, user experience, usability.

A. Kapiton<sup>1</sup>, O. Skakalina<sup>1</sup>, R. Baranenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

<sup>2</sup> Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine

## DESIGN AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF A KNOWLEDGE EXCHANGE WEB SERVICE

**Abstract.** The article analyzes the problem of system development and implementation of a knowledge sharing web service. The purpose of the article is to research the possibilities of current technologies used in the process of designing and software implementation of a knowledge exchange web service. The methods of developing the designed software product were analyzed. The paper considers the purpose of a web service for knowledge exchange, taking into account the definition of the target audience of the developed product. Web technologies for software development are selected and substantiated by the authors. The proposed structure of the knowledge sharing web service.

**Keywords:** web service, information exchange, programming language, design, software product.

### Introduction

The centralized nature of data management in the database requires the existence of some person (group of persons) who is entrusted with the functions of administering the data stored in the database. The main task of the database is the guaranteed preservation of significant amounts of information and providing access to it to the user or the application program. Thus, the database consists of two parts: stored information and its management system. In order to ensure the efficiency of access, data records are organized as a set of facts (data element).

Designing a relational database consists of designing the tables that represent the subject area and defining the relationships between them. The "entity-relationship" model (ER-model) is a data model that allows you to describe conceptual schemes using generalized block structures.

An ER model is a data meta-model, that is, a means of describing data models.

**Analysis of recent research and publications.** The problem of developing special knowledge exchange software is of interest to many scientists. To create the key characteristics of the model of the knowledge exchange system being developed, an analysis of a number of publications dedicated to the analysis of existing services was carried out and their features and shortcomings were determined. M. Beshley, M. Klymash, H. Beshley, O. Urikova, Yu. Bobalo, Yu. investigate the problems of using network equipment for the implementation of a knowledge exchange web service [1]. J. Bloomberg, N. Shpak, O. Kuzmin, Z. Dvulit, T. Onysenko, W. Sroka studies the main issues of digitization and digital transformation [2, 9]. The problem of structuring the fuzzy knowledge base of impact factors of the IT industry is considered by M. Bublyk, A. Karpyak, O. Rybytska, Y. Matseliukh, N. Chukhrai, T. Shcherbata [3, 4, 5, 6]. The modern development of IT clusters and ways of its intensification are studied by M. Melnyk, E. Korcell-Olejniczak, N. Chorna, N. Popadynets, O. Pyrog, A. Poritska, K. Tan, S. Chong and others [7, 8, 10].

### Main part

In the aspect of the investigated problem, the task was set to design and programmatically implement a web service for knowledge exchange, which should ensure the following functions: separation of the user and administrative parts of the software complex; the registered user must be able to log into the system without hindrance; ensuring that users create questions and answer them; ensuring the creation of a user profile; ensuring the search for questions; ensuring the creation of tags and filtering of questions by tags; draft for questions and answers; the possibility of evaluating answers and questions; commenting on answers; admin panel with full control.

A database management system (DBMS) is a set of software and language tools necessary for creating databases, maintaining them in an up-to-date state, and organizing the search for the necessary information in them.

The service uses the PostgreSQL DBMS. PostgreSQL is an object-relational database management system. It is an alternative to both commercial databases (Oracle Database, Microsoft SQL Server, IBM DB2 and others) and open source databases (MySQL, Firebird, SQLite). Supports simultaneous database modification by several users using the MultiVersion Concurrency Control (MVCC) mechanism. This fulfills ACID requirements and virtually eliminates the need for read blocking.

It is based on important semantic information and is intended for logical presentation of data. Defines the value of data in the context of their relationship with other data.

The fact that all existing data models (hierarchical, network, relational, object) can be generated from the entity-relationship model is important, so it is the most general. Any fragment of the visual area can be represented as a set of entities, between which there are a certain set of connections. Django uses multiple related tables. One-to-many connections are established between them. For example, one user may have many questions.



We will describe the database of the web service, which was developed in the process of performing the assigned task. It consists of the following main tables:

1. Question\_questions (table of questions), it stores all data about questions:

- title (question title field);
- image (picture field, if available);
- slug (field for searching by url);
- content (question description field);
- status (issue status: printed\draft);
- create\_date (date of creation);
- update\_date (update date);
- uuid (unique id);
- create\_user (user who created).

2. Question\_answers (table of answers):

- answer (answer field);
- date (date of creation);
- uuid (unique id);
- question\_id (id of the question to which the answer is given);
- user\_id (id of the user who answered).

3. Question\_tags (table of tags):

- tag (tag field);
- uuid (unique id);
- question\_id (id of the question to which the tag belongs).

4. Useraccount\_useraccount (user profile table):

- avatar (user avatar field);
- description (information about the user);
- uuid (unique id);
- user\_id (id of the user to whom the profile belongs).

5. Auth\_user (user authorization table):

- password (password);
- last\_login (last login);
- is\_superuser (administrator rights);
- username (user name);
- first\_name (name);
- last\_name (surname);
- date\_joined (date of registration).

6. Question\_upvotes (table of the number of likes):

- answer\_id (answer id);
- question\_id (question id);
- uuid (unique id).

Most tables are linked to one or more tables by a single field. This field is a unique identifier for each record. This is reflected in more detail in Table 1.

This model of database organization is most suitable for this system. This organization allows you to make some changes to the system. The user can change his data, edit questions and answers. Fields are not duplicated, the database is normalized.

Table 1 – Table of common connections

Table	Data	Connections with other tables
Django_session	Django session information	Absent
Django_migrations	Information about django migrations	Absent
Django_site	Information about the project	Absent
Question_upvotes	Data about preferences	Question_answers through answer_id
Question_answers	Response data	Auth_user through auth_user_id, question_questions through question_id
Question_questions	Question data	Auth_user through auth_user_id
Authtoken_token	Access key for authorized user	Auth_user through auth_user_id
Useraccount_useraccount	User profile	Auth_user through auth_user_id
Account_emailconfirmation	Data on sending confirmation mail	Account_emailaddress through Account_emailaddress_id
Account_emailaddress	Mail confirmation data	Auth_user through auth_user_id
Socialaccount_socialaccount	Data about social accounts	Auth_user through auth_user_id

This model of database organization is most suitable for this system. This organization allows you to make some changes to the system. The user can change his data, edit questions and answers. Fields are not duplicated; the database is normalized.

The choice to use Python for backend development is justified by the fact that it is an interpreted language, which allows you to save a significant amount of time that is usually spent on compilation.

Python is an extensible language: knowing C allows you to add new built-in functions or modules to perform critical operations at maximum speed or to write an interface to commercial libraries available only in binary form. A Python language interpreter can be

built into a program written in C and used as an extension or command language for that program. Python is currently used by tens of thousands of programmers worldwide, and the number of people using it is growing rapidly, doubling and tripling every year. This language works equally well on Windows, UNIX, Macintosh, and OS/2, and can be used to easily develop both small applications or scripts and to deploy large programs. The performance of the created application depends on its features. Of course, for a numerical algorithm that performs ordinary integer arithmetic in a 'for' loop, it doesn't matter what language it's written in. However, in the future, modern computers have so much unused computing potential

that for 90% of applications, performance is related to the choice of language. Java also compiles to bytecode, but is currently slower than Python in most cases. In addition, it is very easy to combine Python with modules written in C or C++, which can be used to increase the speed of programs in critical areas.

The choice to use the Django framework is based on the fact that it is a high-level open Python framework (software framework) for developing web systems. A Django site is built from one or more parts, which are recommended to be modular. Django's initial development as a tool for working with news resources has had a strong influence on its architecture: it provides a number of tools that help in the rapid development of informational websites. Django was created to manage news sites, but since the beginning of its distribution in the status of open software, it has gained enormous popularity around the world as a platform for numerous systems.

The use of Nginx as a web server (a free web server and a proxy server) is due to the fact that its working processes serve many connections at the same time, multiplexing them with operating system calls select, epoll (Linux) and kqueue (FreeBSD). Work processes perform a cycle of processing events from descriptors (see event-oriented programming). The data

received from the client is analyzed using a finite state machine.

## Conclusions

In the process of work, a web service was developed for the exchange of knowledge, which, according to the authors, is completely ready for use. The software product is a separate web application that will significantly affect the search for answers to questions that arise during training.

This application is primarily aimed at teachers of higher education institutions, students and ordinary users. The purpose of creating the application is to provide answers to questions that may arise in the learning process, which will affect the process of knowledge exchange.

This software product has the following development prospects: it can be used in various fields; in the future, it is possible to implement a system of recommendations based on the previous questions; implementation of influence on emerging content.

During the development of the software product, modern web technologies were selected and substantiated. The developed web service for knowledge exchange fully meets all the requirements set at the task setting stage and is ready for use.

## REFERENCES

1. Beshley, M., Klymash, M., Beshley, H., Urikova, O. and Bobalo, Yu. Future intent-based networking for QoE-driven business models. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 831. 2022. 1-18.
2. Bloomberg J. Digitization, digitalization, and digital transformation: confuse them at your peril. *Forbes*. 2018.
3. Bublyk M., Karpayak A., Rybytska O. and Matseliukh Y. Structuring the Fuzzy Knowledge Base of the IT Industry Impact Factors. *IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. 2018. 21–24. [Electronic resource] - Access mode: <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2018.8526760>.
4. Bublyk M.I., Karpiak A.O., Rybytska 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.
5. Chukhrai, N. I., & Shcherbata, T. S. Cooperation between IT development enterprises and universities. *Marketing And Management Of Innovations*. (3). 2016. 161-169.
6. Karpayak A., Rybytska O. Cluster Analysis Of Motivational Management Of Personnel Support of IT Companies COLINS-2022: 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems, May 12–13, 2022 Gliwice, Poland. [Electronic resource] - Access mode: <http://ceurws.org/Vol-3171/paper119.pdf>
7. 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.
8. Pyrog, O., & Poritska, A. The formation of digital business factors. *Economics, Entrepreneurship, Management*. 1 (7). 2020. 10-17. [Electronic resource] - Access mode: <https://doi.org/10.23939/eem.2020.01.010>
9. Shpak, N., Kuzmin, O., Dvulit, Z., Onysenko, T. and Sroka, W. Digitalization of the marketing activities of enterprises: case study. *Information*, [online] 11(2). 2022.
10. Tan, K. S., Chong, S. C. Internet-based ICT adoption: Evidence from Malaysian SMEs. *Industrial Management and Data Systems* 109(2). 2009. 224-244.

Received (Надійшла) 30.08.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.10.2022

## Проектування та програмна реалізація веб сервісу з обміну знаннями

А. Капітон, О. Скакаліна, Р. Бараненко

**Анотація.** У статті проаналізовано проблему системної розробки та впровадження веб сервісу з обміну знаннями. Метою статті є дослідження можливостей актуальних технологій, що застосовують у процесі проектування та програмної реалізації веб сервісу з обміну знаннями. Проаналізовано методи розробки спроектованого програмного продукту. У роботі розглянуто призначення веб-сервісу для обміну знаннями, з урахуванням визначення цільової аудиторії розробленого продукту. Авторами обрано та обґрунтовано веб-технології для розробки програмного забезпечення. Запропонована структура веб сервісу з обміну знаннями.

**Ключові слова:** веб сервіс, обмін інформацією, мова програмування, проектування, програмний продукт.

Valentin Kozlov<sup>1</sup>, Yury Kozlov<sup>2</sup>, Andriy Pasichnyk<sup>3</sup>

<sup>1</sup> National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup> Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

<sup>3</sup> National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

## APPLICATION OF THE PROVISIONS OF THE GENERAL THEORY OF MEASUREMENTS WHEN SOLVING SELECTION PROBLEMS

**Abstract.** The impetus for this publication was an article on the possibility and need to use the general theory of measurement in judicial practice based on considerations of the state and prospects of judicial decisions by the judiciary, as they solve the problem of choice (punishment or justification) as a result expert evaluation in conditions of uncertainty. The article discusses the possibility of disseminating methods and tools for decision-making in the field of metrology as a result of measurement and expert evaluation in conditions of uncertainty in such areas as pedagogical and general qualimetry. To solve the problem, it is proposed to use in educational practice to assess the level of learning (level of acquisition of knowledge, skills and abilities) of subjects of learning four-point scales of the order. Their compatibility with the stobal rating scale and the corresponding ESTC scale is shown. The corresponding nomogram is given, the logarithmic four-point scale of which is obtained on the basis of the probabilistic-information approach. The procedure of data processing of expert assessment (measurement) in pedagogical qualimetry is considered, which can be partially used for processing the characteristics of objects of comparison (OC) in qualimetry. The possibility of applying traditional and improved four-point scales and elements of fuzzy mathematics in qualimetry in the construction of OC models. As directions of implementation of the principles of the general theory of measurements and procedures of expert estimation (measurement) at the decision of problems of a choice it is offered to improve legal, normative, directive and other documents on metrological activity concerning concrete subject area and objects of comparison, and distribution of their scope.

**Keywords:** metrology; qualimetry; uncertainty; order scales.

### Introduction

Searching for information on the subject of the article in the Google Scholar search engine did not return any results.

In the article [1] the directions of improvement of scientific, methodical and organizational bases of the general theory of measurements (GTM) for the purpose of their application at an expert estimation in various branches are considered. The impetus for its publication was the article [2], which deals with the possibility and

need for the use of GTM in judicial practice, as the judiciary makes a court decision as a result of the results of expert evaluation in conditions of uncertainty. The considerations of the publication [2] concern the comparison of different levels and means of decision-making in metrology and jurisprudence and are extended [1] to such areas as pedagogical and general qualimetry (table 1).

Objects of comparison (OC) and basic objects (BO) of comparison mean products (products, services, etc.) or subjects of study (SS).

Table 1 – Levels and means of decision-making in metrology and other fields

Metrology	Judicial practice	Pedagogical qualimetry	General qualimetry
State standards (Gosstandart)	Laws (Supreme Court)	Education standards (from a certain field of knowledge)	Legislative (regulatory) documents
Working standards	Courts of second instance	Fundamental printed works (monographs, textbooks, etc.) and their sections	List of properties of BO
Measuring instruments	Courts of first instance	Expert teacher (group of experts) and assessment tools SS-OC	Expert (group of experts) and means of evaluating / measuring the properties of OC

### Presentation of the main material

In [3] the use of a four-point scale and an improved four-point scale (IFS) of the order in the system of assessment of the level of learning (level of acquisition of knowledge, skills and abilities) of SS, which makes the use of ten- and twelve-point scales is impractical. The indicator of learning (preferably integrated) shows the intermediate or final learning outcome. The Bologna Declaration recommends for use in educational practice the rating scale (RS), the corresponding ESTC-scale and the control procedure, "tied" to the division of the entire scope of a particular discipline into blocks of content modules (BCM) and content modules (CM), and the accumulation of points

obtained during the control. Probabilistic-information approach to the evaluation procedure [4] allowed to obtain an expression for determining the evaluation on any logarithmic L-score scale:

$$Q_L = N_i + \log_2[-2^L / ((2^L - 1)q - 2^L)], \quad (1)$$

where  $N_i$  is the initial mark of the scale;  $L = |N_e - N_i|$  – scale length;  $N_e$  is the end mark of the scale.

In Fig. 1 shows a graph of the dependence of the estimates  $Q$  of two-, three-, four-, ten- and twelve-point scales, the beginning of which is combined with zero, on the share  $q$  of the returned SS information during control.

Here  $q$  – the share of information returned by the subject of training during testing, written or oral survey

– the numerical result of the assessment of learning for CM, BCM or in general for the discipline:

$$q = n_c / n_s, \tag{2}$$

where  $n_c$  – the number of correct answers, decisions;  $n_s$  – the total number of questions, tasks, tasks that determine the content of knowledge of the subject area.

The value of  $q=1$  is an exemplary result. We emphasize that the presence of a sample (standard, in terms of metrology) involves measuring on a scale of relations. This procedure in pedagogical qualimetry can be implemented based on the concept of information entropy, but this issue needs a separate discussion.

Analysis of functional dependences (Fig. 1) shows that the scatter of the values of estimates increases with increasing length of the scale L, especially sharply for values of  $q > 0.8$ .

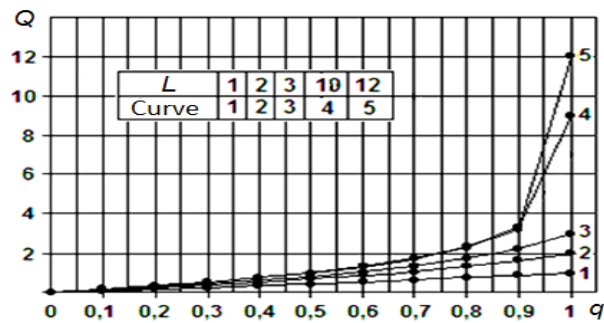


Fig. 1. Graphs of dependences  $Q = f(q)$

Thus, it is logical to assume that the use of logarithmic scales longer than three does not make sense, and the use of traditional and advanced four-point scales as the basis for expert evaluation (in particular, the level of study) will be justified. Scores on a logarithmic four-point scale (LFS):

$$Q_{LFS} = 2 + \log_2[-8/(7q - 8)]. \tag{3}$$

Approximation  $Q_{LFS} = f(q)$  three lines (Fig. 2) in the range of estimates 2.00-3.00; 3.00-4.00; 4.00-5.00, which correspond to the values of  $q$  in the ranges 0-0.57; 0.57-0.86; 0.86-1, does not change the “logarithmic essence” of the approximated logarithmic four-point scale (ALFS), but allows to simplify the calculations of estimates.

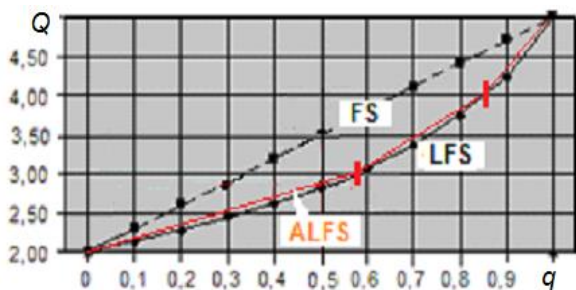


Fig. 2. Graphs of dependences  $Q_{FS} = f(q)$

In Fig. 2 shows graphs of four-point advanced (traditional), logarithmic and approximate scales. We emphasize that the values of ALFS estimates differ from the corresponding LFS values, but their relative position does not change, which is decisive. The maximum given errors of estimates in the approximation intervals are

1/57, 1/29 and 1/14 of the score, respectively. Nomogram (Fig. 3), which combines IFS, RS, ALFS and ESTC-scale, allows you to use these scales to assess the level of study of SS in any combination without additional calculations, and the end result is presented in a predetermined scale or as a coefficient of compliance in the range of normalized values from zero to one, or as a percentage (actually – on a rating scale).

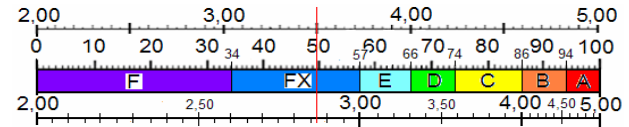


Fig. 3. Nomogram of assessments of scales of pedagogical qualimetry

As the example shows (see fig. 3), a fixed score of 3,50 on the advanced four-point scale corresponds to a score of 50 on the stem scale (or a coefficient of conformity of 0,50), FX on the ESTC scale, and 2,83 on the approximated logarithmic four-point scale.

Note that the introduction of RS was accompanied by "voluntarism" by higher education institutions (HEIs), as shown in Table 2 for generalized data [5] and universities of authors and others.

Table 2 – Scores on different scales of order

Score on a four-point scale	Rating ECTS	Grades on the stem scale		
		declared	calculated	applied
Vidminno	A	94-100	94-100	81-100
Dobre	B	86-94	86-94	74-89
	C	74-86	74-86	61-75
Zadovolno	D	67-74	66-74	50-74
	E	57-67	57-66	35-60
Nezadovolno	FX	34-57	34-57	22-59
	F	0-34	0-34	0-34

The practical convergence of the declared and calculated by formula (3) estimates for RS in the ranges of the FS and ECTS scale suggests that the Bologna Declaration proposed the use of the system of stem rating assessment is based on the concept of probabilistic-information approach. This approach is acceptable for test control (in particular, using a computer with special software as a means of assessing SS), focused on "covering" the total number of questions (tasks, tasks) of a certain amount of educational material taken as a sample.

Thus, the procedure for processing expert evaluation data in pedagogical qualimetry consists of a sequence of the following actions:

- formation of sets of results of assessment of knowledge, skills and abilities of subjects of training in one of two ways: in an absolute scale as a share of the returned SS information at control; in a traditional four-point scale or an advanced four-point scale;
- calculation of average grades in an improved four-point scale;
- the expression of average grades in a form acceptable for the construction of the rating list in the two-point, logarithmic four-point, rating scale and the corresponding ECTS scale or otherwise.

The quality of products (services, etc.) is usually assessed by comparing products with each other or with the base object.

Any basic object (BO) is characterized by a set of its quantitative and qualitative properties, which consists of experts who attribute the scores of the FS according to the rules associated with the statements "Yes" – 5, "Rather yes, than no" – 4, "Rather no, than yes" – 3, "No" – 2 in response to questions such as "Is the property inherent in the base object or not?" The result of this procedure is an information model of the basic object (actually – a sample – an analogue of the standard or working standard) in the thesaurus (dictionary) and the alphabetical index of the properties of the BO.

Quantitative characteristics of the properties of the object of comparison are obtained by measurements by appropriate methods (techniques). Uncertainty-based measurement results can be provided as membership functions.

Qualitative characteristics of the OC are evaluated by the same method of assigning points, as described above, for judgments such as "Does this property match

the object of comparison and BO?" The obtained data of non-numerical nature are used to construct the resulting characteristic membership function (RCMF). Fasication of RCMF using the method of center of gravity [6] gives the desired result - an integral indicator of the quality of OP as an arithmetic mean, which does not contradict the theory [7] and confirmed by calculations [8].

### Conclusion

The extension of the principles of GTM to the areas of activity where decisions are made on the basis of expert assessment / measurement requires:

- improvement of legal, scientific, methodological, organizational principles and evaluation (measuring) procedures;

- finalization of normative (directive, guiding, administrative and other) documents on metrological activities related to a specific subject area and specific objects of comparison, and expansion of their scope.

Establish the possibility of using different types of scales to solve the problem of comparing objects of comparison.

### REFERENCES

1. Dehtyar'ov O.V., Dubrovina V.V. , Kozlov V.Ye. , Kozlov Yu.V. Zahal'na teoriya vymiryuvann' yak osnova ekspertnoho otsinyuvannya [General theory of measurements as a basis for expert evaluation]. *Systemy obrobky informatsiyi*. – Kharkiv: KHUPS, 2015. – Vyp. 10 (135). – P. 178-181. (in Ukrainian).
2. Shishkin I.F. Justice de jure and de facto [Pravosudye de-yure y de-fakto]. Available at: [ttp://ria-stk.ru](http://ria-stk.ru).
3. Kozlov V.Ye. , Kozlov Yu.U. V. , Kobzyev V.G. , Moshchenko I.O. Metod otsinyuvannya rivnya vyvchenosti sub'yekta navchannya [Method of assessing the level of study of the subject of education]. *Information systems and technologies IST-2020: materials of the 9th International*. November 17-20, 2020 - Kharkiv, Ukraine. - Kharkiv: Printing House Madrid, 2020. - P. 160-162. (in Ukrainian).
4. Kozlov V.Ye., Olenchenko V.T., Yuz'kov I.O. Model' podannya otsinnykh funktsiy vykladacha [Model of representation of evaluative functions of the teacher]. *Systemy obrobky informatsiyi*. – Kharkiv: KHU PS, 2009. – Vyp. 6(80). – P. 233–236.
5. Varhalyuk V., Derkach T. Analiz rezul'tativ pedahohichnoho eksperymentu z vprovadzhennya shkaly ECTS u VNZ Ukrayiny [Analysis of the results of a pedagogical experiment on the implementation of the ECTS scale in Ukrainian universities]. *Informatyka ta informatsiyini tekhnolohiyi v navchal'nykh zakladakh*. №2, 2007. P. 66-70. (in Ukrainian).
6. Kozlov V.Ye, Novikova O.O. Teoretyko-mnozhyunnyy metod ekspertnoho otsinyuvannya [Theoretical-multiple method of expert evaluation]. *Systemy obrobky informatsiyi*. - Kharkiv: KHU PS, 2012. – Vyp. 9(107). – P. 291-293. (in Ukrainian).
7. Orlov A. I. Ekonometrika. [Econometrics], Rostov-na-Donu, Feniks, 2009. 572 p. (in Russian).
8. Horelyshyev S.A., Iokhov O.Yu., Novykova O.O. Teoretyko-mnozhyunnyy metod profesynoho vidboru [Theoretical-plural method of professional]. *Systemy obrobky informatsiyi*. – 2011. – Vyp. 2(92). – P. 188-190. (in Ukrainian).

Received (Надійшла) 29.08.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.10.2022

### Застосування положень загальної теорії вимірювань при розв'язанні задач відбору

В. С. Козлов, Ю. В. Козлов, А. В. Пасічник

**Анотація.** Поштовхом до публікації стала стаття про можливість і необхідність використання загальної теорії вимірювання в судовій практиці, виходячи з міркувань стану та перспективи судових рішень судовими органами, оскільки вони вирішують проблему вибору (покарання чи виправдання) як результат експертної оцінки в умовах невизначеності. У статті розглядаються можливості поширення методів та засобів прийняття рішень у сфері метрології за результатами вимірювань та експертного оцінювання в умовах невизначеності в таких сферах, як педагогічна та загальна кваліметрія. Для вирішення проблеми пропонується використовувати в освітній практиці для оцінювання рівня навченості (рівня засвоєння знань, умінь і навичок) суб'єктів навчання чотирибальні шкали порядку. Показано їх сумісність зі стобальною шкалою оцінок і відповідною шкалою ECTS. Наведено відповідну номограму, логарифмічну чотирибальну шкалу якої отримано на основі імовірно-інформаційного підходу. Розглянуто процедуру обробки даних експертної оцінки (вимірювання) у педагогічній кваліметрії, яка може бути частково використана для обробки характеристик об'єктів порівняння у кваліметрії. Можливість застосування традиційних та вдосконалених чотирибальних шкал та елементів нечіткої математики в кваліметрії при побудові моделей об'єктів порівняння. В якості напрямів реалізації принципів загальної теорії вимірювань і процедур експертного оцінювання (вимірювання) при вирішенні проблем вибору пропонується удосконалити законодавчі, нормативні, директивні та інші документи з метрологічної діяльності щодо конкретної предметної галузі та об'єкти порівняння та розподіл їх сфери.

**Ключові слова:** метрологія; кваліметрія; невизначеність; замовлення ваги.

А. І. Кулягін<sup>1</sup>, В.В. Нарожний<sup>1</sup>, В. М. Ткачов<sup>2</sup>, Г. А. Кучук<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

<sup>3</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ РЕКОМЕНДАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ВИБОРУ НАЙБІЛЬШ РЕЛЕВАНТНОГО ВІДЕО ПРИ СТВОРЕННІ ВІРТУАЛЬНИХ АРТ-КОМПОЗИЦІЙ

**Анотація. Актуальність.** Через зростання цифровізації мистецтва постають задачі покращення імерсивності під час взаємодії користувача з системами extended reality мистецтвом. **Методи дослідження.** Колаборативна фільтрація матричною факторизацією, метод рекомендацій, заснований на знаннях, глибока нейронна мережа з шарами занурення. **Мета статті:** використовуючи моделі рекомендаційних систем побудованих на різних принципах провести низку обчислювальних експериментів на модельних даних і, порівнюючи результати, перевірити, який із існуючих підходів до побудови рекомендаційних систем покаже найліпші результати при розв'язанні нашої задачі - побудови системи вибору віртуальної арт-композиції. **Отримані результати.** Проаналізовано ефективність різних методів побудови рекомендаційних систем для розв'язування задачі вибору відео у віртуальних арт-композиціях з урахуванням явного та неявного фідбеку користувачів. Перевірено, що найбільш ефективним виявився підхід з використанням гібридної моделі, яка поєднує метод колаборативної фільтрації, метод рекомендацій, заснований на знаннях і глибоку нейронну мережу з шарами занурення. Доведено, що завдяки математичному апарату глибоких нейронних мереж можна ефективно розв'язати задачу вибору відео у віртуальних арт-композиціях з урахуванням вподобань користувача. **Висновок.** Розроблений у роботі підхід може бути використаний для покращення імерсивності під час взаємодії користувача з системами extended reality мистецтвом.

**Ключові слова:** колаборативна фільтрація, метод рекомендацій, заснований на знаннях, глибока нейронна мережа з шарами занурення, extended reality, імерсивність.

### Вступ

Цифровізація мистецтва, зокрема, способів взаємодії користувачів з витворами мистецтва, в останні роки активно розвивається. Перспективним напрямом є поєднання живопису та технологій VR/AR/MR, загалом XR (extended reality) [1].

Припустимо, що є мобільний додаток, який дозволяє за допомогою камери сканувати зображення-маркери, робити їх AR якорями та показувати на їх місці відео, завантажене з серверу. В якості зображення-маркера може виступати, наприклад, витвір живопису у музейній композиції. Сукупність зображення та відео, яке прив'язане до зображення, називається віртуальною арт-композицією.

Розпізнавання зображення-маркера відбувається на сервері. Після розпізнавання система повинна обрати відео, яке найбільш відповідає вподобанням користувача (за жанрами, кольоровою гамою, композицією тощо). Далі воно коригується з урахуванням явного (сподобалась композиція чи ні, рейтингова оцінка, додаткове анкетування) та неявного (додивився до кінця, як довго фокусувався на композиції тощо) фідбеку. Початкове визначення вподобань користувача може здійснюватися за допомогою анкетування, яке кожен користувач має пройти на початку користування додатком. За його результатами до профілю користувача будуть додані дані, які можуть бути вказувати на його вподобання, наприклад: гендер, вік, улюблений колір, улюблені жанри живопису та ін.

На наш погляд, очевидним рішенням розв'язання задачі визначення відео, яке необхідно обрати згідно з вподобаннями користувача, є використання рекомендаційних систем.

Система вибору відео для показу користувачеві повинна відповідати таким вимогам:

1) вибір має здійснюватися на основі профілю користувача та/або його минулих фідбеків;

2) у кожного зображення-маркера та відео будуть різні характеристики, які потрібно врахувати при виборі;

3) при наданні рекомендації система повинна враховувати відгуки на віртуальну композицію від інших користувачів.

Таким чином, система вибору відео може мати на вході дві робочі ситуації:

*Ситуація 1.* На вході системи віртуальна арт-композиція  $K: A, \{V_1 \dots V_n\}$  ( $A$  - якор +  $V_i$  конкретне відео), яка не має рейтингових оцінок жодного з користувачів (ситуація холодного старту). В такому випадку система має обрати композицію  $K$ , в якій відео має ознаки, що найбільше відповідають профілю користувача (наприклад, по кольоровій гамі, жанрам живопису тощо).

*Ситуація 2.* На вході системи віртуальна арт-композиція  $K: A, \{V_1 \dots V_n\}$  ( $A$  - якор +  $V_i$  конкретне відео), яка вже має деяку кількість рейтингових оцінок від інших користувачів. Користувач, який потребує рекомендації для цієї композиції, має рейтингові оцінки інших віртуальних композицій. В такому випадку система має обрати композицію  $K$  на основі спільних оцінок даного користувача та інших користувачів, які оцінювали дану віртуальну композицію.

**Мета статті:** ідея даного дослідження полягає в наступному: на модельних даних провести низку обчислювальних експериментів з метою порівняння ефективності використання різних моделей рекомендаційних систем для розв'язання задачі побудови системи вибору віртуальної арт-композиції.

## Виклад основного матеріалу

Почнемо з підсумку того, які дані пропонує нам реальний світ:

Цільова змінна — рейтинги можуть бути явними (тобто користувач залишає відгук) або неявними (тобто передбачають позитивний відгук, якщо користувач додивився до кінця відео частину віртуальної арт композиції). У будь-якому випадку вони необхідні. #Review

Властивості продукту — опис характеристик продукту (наприклад, жанрів живопису, в яких виконано картини у віртуальних арт композиціях), які в основному використовуються в методах на основі вмісту.

Профіль користувача — інформація, яка описує характеристики користувача: може бути демографічною (тобто стать і вік) або поведінкою (тобто вподобання користувача у живопису або у відеотворах). Здебільшого використовується для рекомендацій на основі знань.

Контекст — додаткова інформація щодо контексту, в якому було отримано конкретний рейтинг (тобто коли, де, історія пошуку). Також часто використовується у рекомендаційних системах на основі знань.

Сучасні рекомендаційні системи всі перелічені види інформації для побудови прогнозу щодо нашого смаку.

Наприклад, YouTube рекомендує нам наступне відео для перегляду, використовуючи все, що Google знає про нас, зокрема наші вподобання.

Існує 4 основні підходи до створення рекомендаційних систем [2, 3]. Це рекомендаційні системи колаборативної фільтрації, на основі контенту, на основі знань та гібридні моделі.

*Колаборативна фільтрація (collaborative filtration).* Суть першого підходу полягає в тому, що у користувачів, які зацікавилися однаковими елементами одного разу, можливо будуть однакові вподобання наступного разу. Процес пошуку співпадінь у спрощеному вигляді можна описати наступним чином: пошук користувачів, котрі мають ті ж шаблони оцінок, що і активний користувач (для якого призначений прогноз); використання рейтингів користувачів зі схожими вподобаннями, що знайдені на попередньому кроці для прогнозу майбутніх вподобань користувача; корекція результатів за фідбеком користувача.

*Рекомендації на основі контенту (content-based recommendations).* Рекомендаційні системи на основі контенту засновані на створених вручну або автоматично витягнутих характеристиках елементів та профілю користувача, в якому надається вага значущості цих характеристик. Загалом, такі системи мають на меті знайти подібні елементи до тих, що користувач вподобав раніше. Порівняно з колаборативною фільтрацією, рекомендації на основі контенту мають дві переваги: по-перше, для досягнення розумної точності рекомендацій не потрібні великі групи користувачів. Крім того, нові елементи можна рекомендувати відразу після того, як з'явиться доступ до характеристик елементів. Однак, в багатьох областях, більш

суб'єктивні характеристики елемента, які можуть бути корисними для генерації рекомендацій, важко отримати автоматично [4]. Це означає, що така інформація повинна вводиться в систему вручну, що є потенційно дорогим і схильним до помилок процесом [5].

*Рекомендації на основі знань (knowledge-based recommendations).* Коли в якомусь нішевому домені немає можливості покладатися на історію покупок або переглядів, з'являється передумова для спільного використання колаборативного підходу та фільтрації на основі контенту. Іноді недостатньо просто уявити елементи, які відповідають заданому набору функцій, що запитуються, оскільки відсутній аспект персоналізації. Так, кожен користувач з однаковими функціями, що запитуються, отримає один і той же набір рекомендацій. У цьому випадку потрібна система, яка використовує додаткові знання для вироблення рекомендацій. У таких підходах система зазвичай використовує додаткову інформацію, що часто надається вручну, як про поточного користувача, так і про доступні елементи. Інший аспект — це «взаємодія з користувачем», оскільки у багатьох рекомендаційних системах, що ґрунтуються на знаннях, вимоги користувача повинні виявлятися в інтерактивному режимі. Отже, для визначення потреб та переваг користувача потрібні складніші типи взаємодії, в основному через відсутність історії покупок, яку можна було б використати. Простий підхід - безпосередньо запитати користувача про його чи її вимоги. Проте, такий підхід потребує не тільки детального технічного розуміння властивостей предмета, а й створює додаткове когнітивне навантаження у сценаріях із великою кількістю характеристик предмета. Тому при більш складних підходах намагаються реалізувати більше стилів розмовної взаємодії, у яких система намагається поступово з'ясувати переваги в інтерактивному та персоналізованому діалозі.

*Гібридний підхід (hybrid approaches).* Різні підходи, які були розглянуті вище, залежно від постановки задачі мають певні переваги та недоліки. Одним із очевидних рішень є об'єднання різних методів для вироблення кращих або більш точних рекомендацій. Наприклад, якщо існують знання спільноти та доступна подібна інформація про окремі елементи, система рекомендацій може бути покращена шляхом гібридизації колаборативної фільтрації з методами на основі контенту [6]. Така зв'язка може бути використана для подолання описаних проблем у чисто колаборативних підходах та використання контенту для нових елементів або нових користувачів [7]. На рис. 1 наведено приклад загальної схеми гібридної рекомендаційної системи.

Можна підсумувати, що для вирішення задачі рекомендацій при різних наявних вхідних даних є необхідність у використанні різних типів рекомендаційних систем. Натомість, різні підходи рекомендаційних систем мають різні вимоги до вхідних даних, які представлені у табл. 1. Ідея полягає в тому, щоб порівняти ефективність використання описаних вище методів побудови рекомендаційної системи віртуальних арт-композицій.

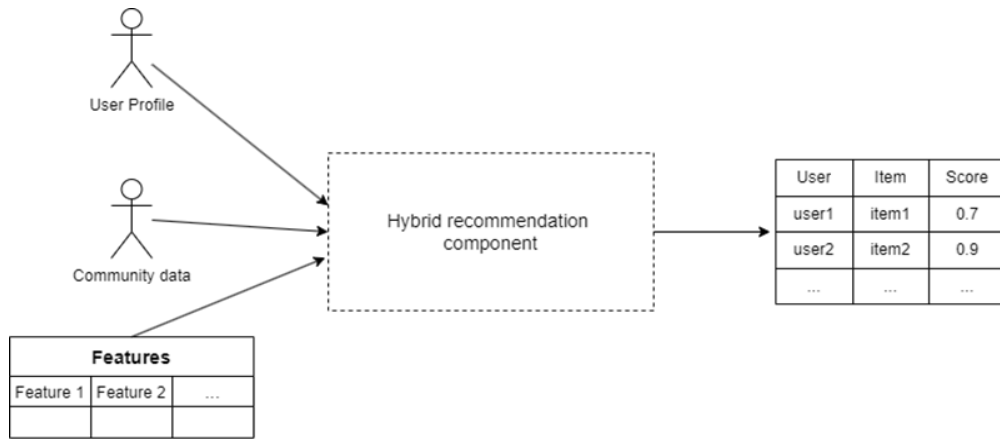


Рис. 1. Загальна схема гібридної рекомендаційної системи

Таблиця 1 – Вимоги до вхідних даних різних рекомендаційних підходів

Підхід	Профіль користувача та параметри контексту	Дані спільноти	Характеристики елемента	Моделі знань
Колаборативний	Так	Так	Ні	Ні
На основі контенту	Так	Ні	Так	Ні
На основі знань	Так	Ні	Так	Так
Гібридний	Так	Можливо	Можливо	Можливо

В основі першої моделі лежать матриця користувачів Users і матриця продуктів Products, створені за допомогою шарів вбудовування (Embeddings Layer) нейронної мережі. Тут вхідні дані — пари "користувач-продукт", а вихідні дані — рейтинг,

присуджений користувачем відповідному продукту. Для прогнозування нової пари "користувач-продукт" модель виконує пошук користувача у просторі занурення Users і продукт у просторі Products. Схема слів моделі показана на рис. 2.

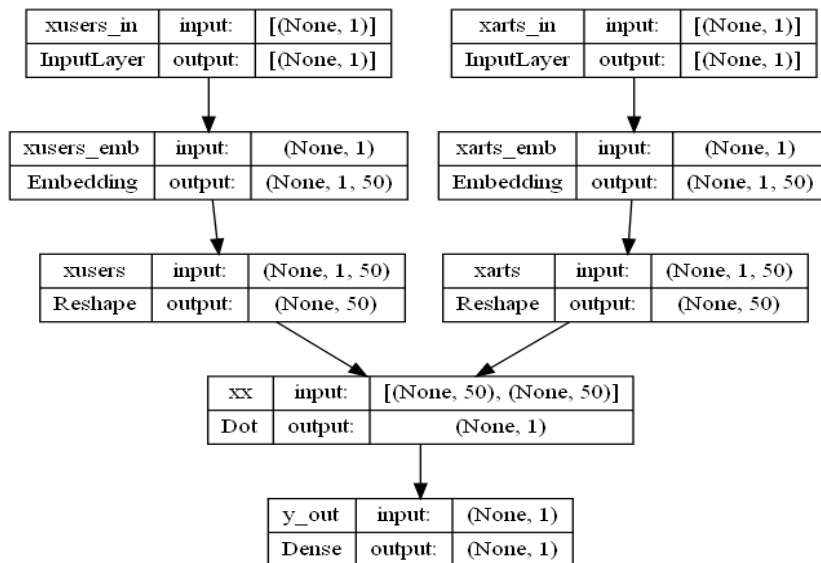


Рис. 2. Слої моделі на основі матричної факторизації

Наразі найсучасніші рекомендаційні системи використовують глибоке навчання. Зокрема, поєднують нелінійність нейронних мереж з матричною факторизацією. Ця модель створена для максимального використання простору вбудовування (embedding space), використовуючи його не лише для традиційної колаборативної фільтрації, але й для повнозв'язної глибокої нейронної мережі. Глибока нейронна мережа має фіксувати шаблони та властивості, які може пропустити матрична факторизація. Схема слів моделі зображена на рис. 3.

Третя модель, яку ми використали для проведення експериментів, є гібридною. Завдяки гнучкості сучасного апарату нейронних мереж стало можливим об'єднати в рамках однієї моделі різні підходи до створення рекомендаційних систем. До моделі Neural Collaborative Filtering ми додали дві окремі глибокі нейронні мережі, які для вибору відео використовують інформацію про властивості віртуальних арт-композицій та інформацію із профіля користувачів. Це, на нашу думку, дозволить підвищити якість рекомендацій, які ми отримуємо від системи. Слої гібридної моделі на рис. 4.



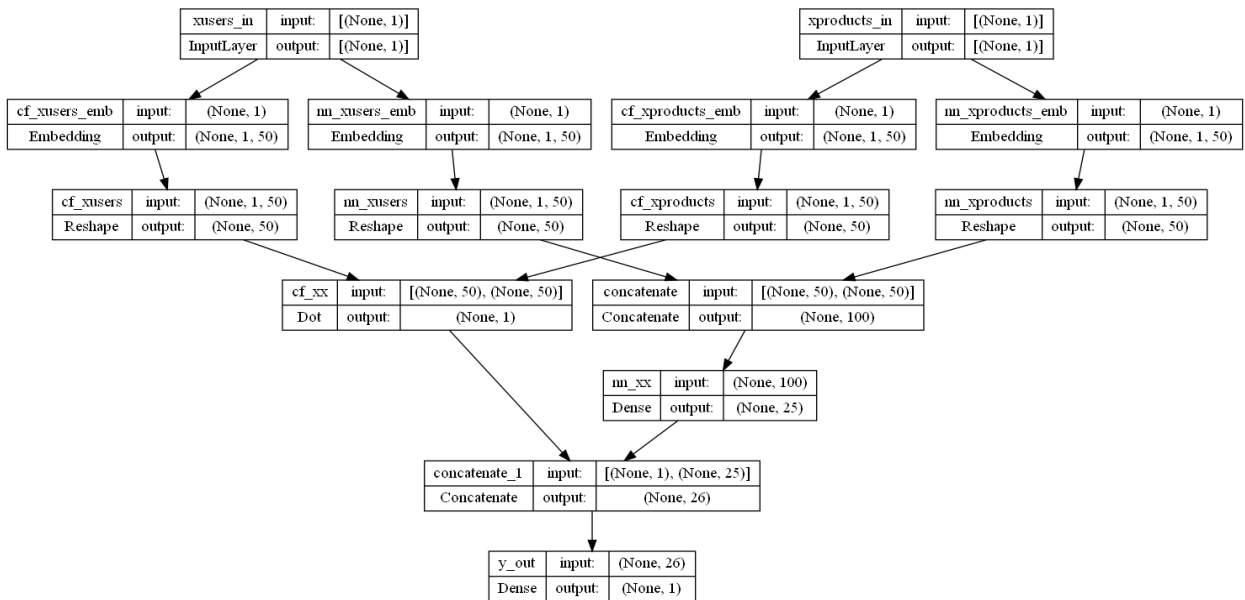


Рис. 3. Слої моделі на основі нейронної колаборативної фільтрації

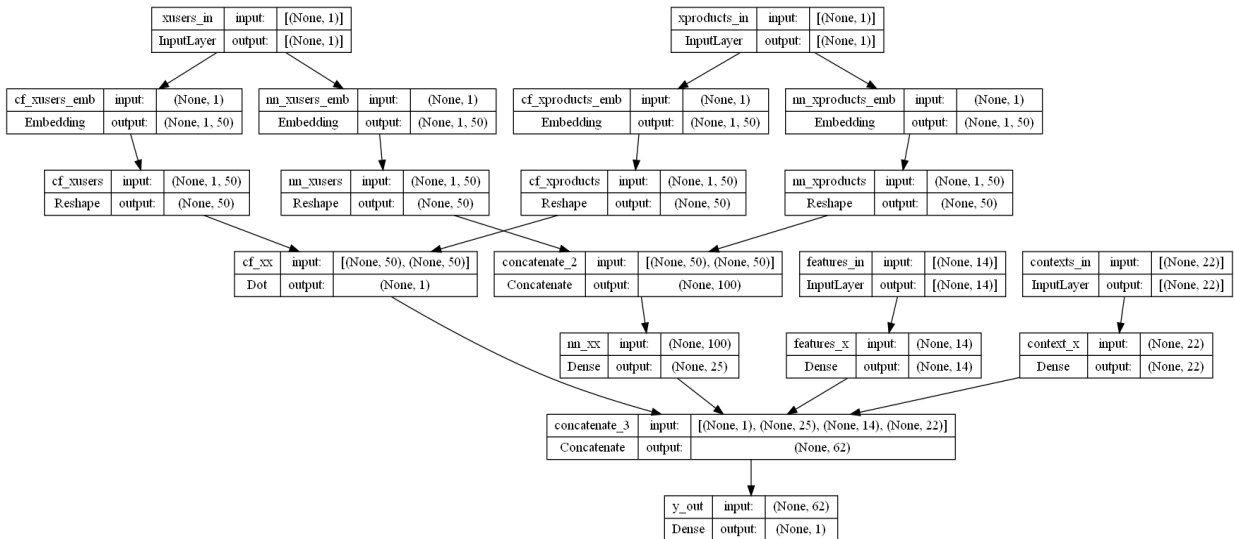


Рис. 4. Слої гібридної моделі

Набір даних для навчання моделі. Для проведення обчислювальних експериментів для порівняння ефективності описаних моделей обрано дані з датасету WikiArt. В якості датасету, що представляє користувачів та їх рейтинг було застосовано псевдо-рандомно згенеровані дані.

Ці дані складаються з трьох наборів, які містять інформацію про користувачів та їх вподобання, а також арт-композиції.

Virtual Art Composition Dataset. Набір даних віртуальних арт композицій містить інформацію про композиції та їх властивості. Його структура зображена на рис. 5. Набір даних містить перелік віртуальних арт-композицій з визначенням ID-номера кожної композиції (image\_path) та жанру живопису, до якого відноситься композиція (class\_name).

Users Dataset. Набір даних користувачів, який містить інформацію про користувачів, рис. 6.

image_path	class_name	rating
/kaggle/input/wikiart-gangogh-creating-art-gan/genre-painting/3d2f9a915a61136f314313ee	genre-painting	6
/kaggle/input/wikiart-gangogh-creating-art-gan/genre-painting/d57e51532362214de671dd3	genre-painting	6
/kaggle/input/wikiart-gangogh-creating-art-gan/genre-painting/7baac30940e875b1eddd04	genre-painting	

Рис. 5. Структура набору даних віртуальних арт-композицій.

id	first_name	last_name	gender	favorite_color_hex	age	genre_1	genre_2	genre_3
1	Inglebert	McKerton	Male	#6d2c6f	16	still-life	animal-painting	landscape
2	Spike	Hanhardt	Male	#d49fd1	53	landscape	abstract	cityscape
3	Muhammad	Hasely	Male	#f6de77	60	nude-painting-nu	mythological-painting	portrait
4	Kaleb	Verine	Male	#4b3552	50	abstract	mythological-painting	still-life

Рис. 6. Структура набору даних користувачів

Кожен рядок в цьому наборі містить характеристики окремого користувача, а саме унікальний ID-номер користувача (id), його прізвище та ім'я (first\_name, last\_name), вік (age), перелік улюблених жанрів живопису (genre\_1, genre\_2, genre\_3) тощо.

*Ratings Dataset.* Набір даних рейтингового оцінювання користувачами віртуальних композицій із Virtual Art Composition Dataset, рис. 7.

user_id	vcomposition_id	y
0	0	4.0
0	2	4.0
0	5	4.0
0	43	5.0

Рис. 7. Структура набору даних рейтингового оцінювання віртуальних арт-композицій.

Цей набір містить дані про кожний випадок при своєму користувачем user\_id рейтингу у віртуальній композиції vcomposition\_id.

*Результати.* Нижче наведені результати обчислювальних експериментів, проведених на описаних моделях з використанням даних, описаних вище. Хочемо звернути увагу, що у використаних моделях задача прогнозування рейтингу відео розглядається як задача регресії.

Для проведення експериментів набір даних було розділено на навчальний та тестовий набори у співвідношенні 80 до 20. Тридцять відсотків навчального набору використовувалось для валідації моделі в процесі навчання.

На рис. 8–10 наведено графіки зміни значень функції втрат і метрики при навчанні відповідних моделей на навчальних даних і перевірки на валідаційних даних.

У всіх трьох моделях було використано в якості функції втрат середню абсолютну помилку (mean absolute error) і середню абсолютну процентну помилку (mean absolute percentage error) в якості метрики, показника, який оцінює модель під час навчання та тестування для моніторингу процесу

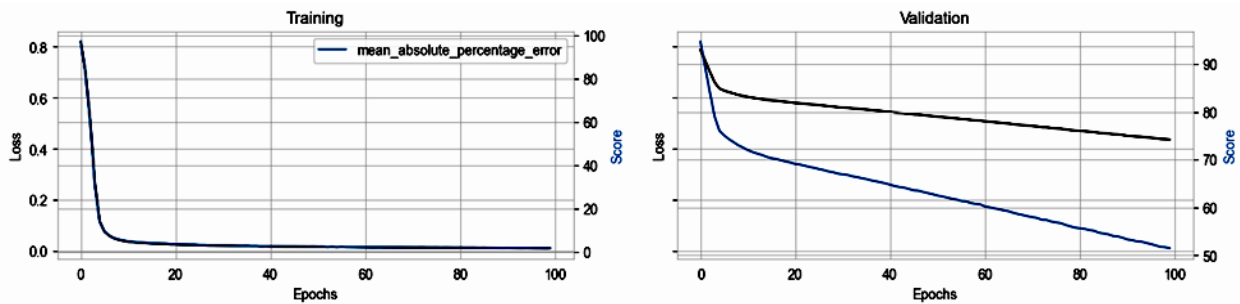


Рис. 8. Графік змін значень функції втрат і метрики під час навчання моделі на основі колабораційної фільтрації матричною факторизацією

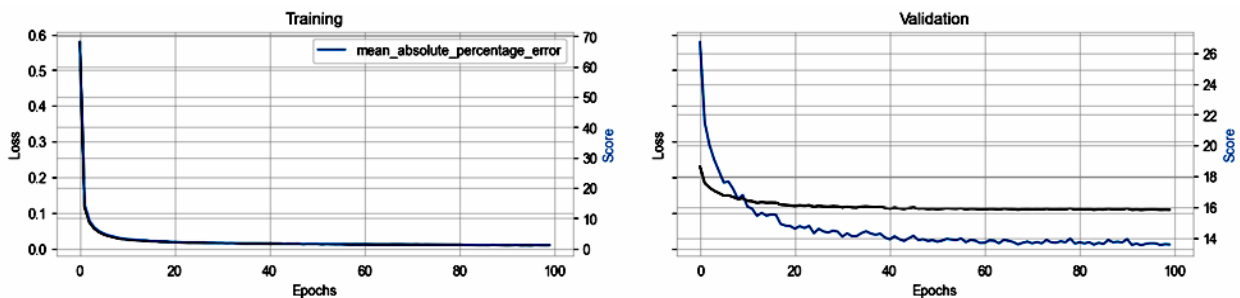


Рис. 9. Графік змін значень функції втрат і метрики під час навчання моделі на основі знань про елементи арт-композицій

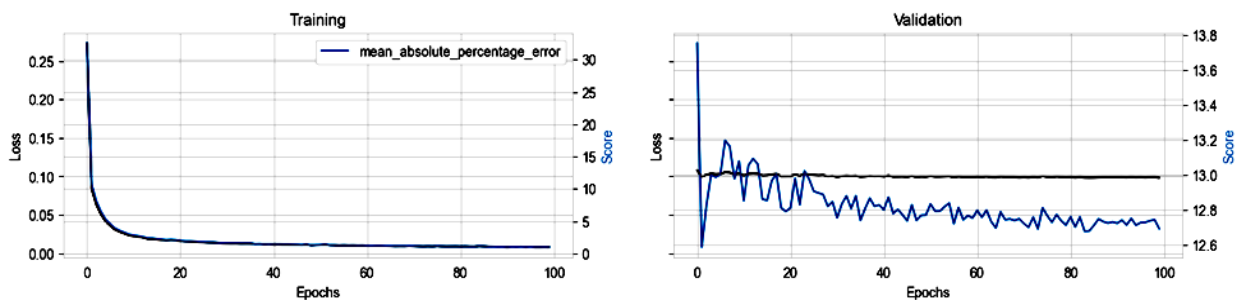


Рис. 10. Графік змін значень функції втрат і метрики під час навчання глибокої нейронної мережі з шарами занурення

Після навчання для перевірки моделі було використано тестовий набір даних і було отримано такі

значення середньої абсолютної помилки (mean absolute error) і середньої абсолютної процентної

помилки (mean absolute percentage error):

Mean Absolute Error ( $\Sigma|y-\text{pred}|/n$ ): 0.4302.

Mean Absolute Perc Error ( $\Sigma(|y-\text{pred}|/y)/n$ ): 50.91%.

В результаті тестування моделі 2 було отримано наступні показники:

Mean Absolute Error ( $\Sigma|y-\text{pred}|/n$ ): 0.1058.

Mean Absolute Perc Error ( $\Sigma(|y-\text{pred}|/y)/n$ ): 13.26%.

Значення показників функції втрат і метрики, отримані під час тестування моделі 3:

Mean Absolute Error ( $\Sigma|y-\text{pred}|/n$ ): 0.0922.

Mean Absolute Perc Error ( $\Sigma(|y-\text{pred}|/y)/n$ ): 12.07%.

Як видно із результатів експериментів, найгірший результат показала перша модель, а найкращий - третя.

На нашу думку, це пояснюється тим, що фактично кожна наступна модель відрізняється від попередньої тим, що в неї додано новий елемент гібридизації. Перша модель реалізує колаборативну фільтрацію методом матричної факторизації. Друга модель є гібридом методів матричної факторизації і колаборативної фільтрації глибокою нейронною мережею. Третя модель додатково містить третій елемент, ще одну глибоку нейронну мережу, яка враховує характеристики користувачів при визначенні рейтингової оцінки відео у віртуальній арт-композиції.

## Висновки

В цій статті ми ставили собі за ціль порівняти ефективність різних методів побудови рекомендаційних систем для розв'язання задачі вибору відео у віртуальних арт-композиціях з урахуванням вподобань користувача. Для проведення дослідження було обрано три методи: метод колаборативної фільтрації матричною факторизацією, метод рекомендацій, заснований на знаннях, і глибоку нейронну мережу з шарами занурення. Як показали результати обчислювальних експериментів, найбільш ефективним виявився підхід з використанням гібридної моделі, яка поєднує в собі метод колаборативної фільтрації, метод рекомендацій, заснований на знаннях, і глибоку нейронну мережу з шарами занурення. Завдяки гнучкості сучасних нейронних мереж можна побудувати таку архітектуру глибокої нейронної мережі, яка буде включати в себе різні підходи, що підвищить ефективність за рахунок виникнення ефекту синергії. Це доводить, що завдяки математичному апарату глибоких нейронних мереж можна ефективно розв'язати задачу вибору відео у віртуальних арт-композиціях з урахуванням вподобань користувача.

**Подальші дослідження** доцільно проводити у напрямі поєднання існуючої системи з генерацією віртуальних арт-композицій з метою збільшення вибірки рекомендацій та нівелювання обмеженої кількості мануально створених віртуальних арт-композицій.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. F. Ye. Image Art Innovation based on Extended Reality Technology // 2022 7th IEEE International Conference on Data Science in Cyberspace (DSC), 2022, С. 584-587.
2. Michael D. Ekstrand. Collaborative Filtering Recommender Systems [Текст] / Michael D. Ekstrand, John T. Riedl, Joseph A. Konstan // University of Minnesota. – 2010. – С. 82–112.
3. Joonseok Lee. A Comparative Study of Collaborative Filtering Algorithms [Текст] / Joonseok Lee, Mingxuan Sun, Guy Lebanon // Cornell University. – 2012. – С. 2-3.
4. Badrul Sarwar. Item-Based Collaborative Filtering Recommendation Algorithms [Текст] / Badrul Sarwar, George Karypis, Joseph Konstan, John Riedl // University of Minnesota, Minneapolis. – 2001. – С. 2-3.
5. Francesco Ricci. Recommender Systems Handbook [Текст] / Francesco Ricci, Lior Rokach, Bracha Shapira, Paul B. Kantor // New York Dordrecht Heidelberg London, 2011. – С. 76-85.
6. Dietmar Jannac. Recommender Systems: An Introduction [Текст] / Dietmar Jannac, Markus Zanker, Alexander Felfernig, Gerhard Friedrich // Technische Universität Dortmund, Germany, 2010. – С. 49-59.
7. Peter Bostron. Comparison of User Based and Item Based Collaborative Filtering Recommendation Services [Текст] / Peter Bostron, Melker Philipson // SKOLAN FÖR DATAVETENSKAP OCH KOMMUNIKATION. – 2017. – С. 6-7.

Received (Надійшла) 30.08.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.11.2022

### Study of methods of building recommendation system for solving the problem of selecting the most relevant video when creating virtual art compositions

A. Kuliakin, V. Narozhnyi, V. Tkachov, H. Kuchuk

**Abstract. Topicality.** Due to the growing digitization of art, the tasks of improving immersiveness during user interaction with extended reality art systems arise. **Research methods.** Collaborative Filtering by Matrix Factorization, a Knowledge-Based Method, Deep Neural Network with Immersion Layers. **The purpose of the article:** using models of recommendation systems built on different principles, conduct a number of computational experiments on model data and, comparing the results, check which of the existing approaches to building recommendation systems will show the best results when solving our problem - building a system for choosing a virtual art composition. **The results obtained.** The effectiveness of various methods of building recommendation systems for solving the problem of video selection in virtual art compositions is analyzed, taking into account explicit and implicit user feedback. It has been verified that the most effective approach using a hybrid model, which combines the method of collaborative filtering, a method based on knowledge and a deep neural network with immersion layers. It is proven that thanks to the mathematical apparatus of deep neural networks, it is possible to effectively solve the problem of video selection in virtual art compositions, taking into account the user's preferences. **Conclusion.** The approach developed in the work can be used to improve immersiveness during user interaction with extended reality art systems.

**Keywords:** collaborative filtering, knowledge-based method, deep neural network with immersion layers, extended reality, immersiveness.

Nina Kuchuk, Anna Shyman

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

## A METHOD FOR DISTRIBUTING TRANSACTIONS TO HYBRID CLOUD DATA STORAGE

**Abstract.** The article discusses the current task of optimal resource allocation in CLOUD systems that support hybrid cloud data storage. The purpose of this article is to develop an optimal distribution method of several heterogeneous transactions to a hybrid cloud data storage, connected by a common bandwidth limitation. The optimization criterion will be the minimum cost. Information flows have certain points of departure and destination, are heterogeneous flows with common restrictions on the bandwidth of the communication channels used. **The results obtained.** The method is based on the construction of network graphs. The optimization problem is reduced to the distribution of flows in the network in such a way that, if the requirements of the cloud hybrid data storage are met, the cost of transmitting the flow in the network is minimal. To solve it, an iterative algorithm for constructing the maximum admissible flow is proposed. At each iteration, the simplex table of network graphs is modified. The direction of further research is the development of a method for optimizing the structure of cloud data storage.

**Keywords:** cloud technologies, data storage, hybridity, CLOUD system, network graph.

### Introduction

In recent years, "cloud technologies" have gained enormous popularity in the field of information technologies [1, 2]. The modern IT market offers a large number of software products that support this technology (hereinafter referred to as CLOUD systems) and ensure the functioning of cloud data storage - a model of online storage in which data is stored on numerous distributed in the network, servers provided for use by clients, as well as cloud computing, which provide distributed data processing, in which the user receives computer resources and power as an Internet service [2].

Among a number of problems that arise during the implementation of CLOUD systems, the most relevant are those related to the distribution of system resources, which is caused by both the significant growth of users and the expansion of services provided by modern CLOUD systems [3, 4]. In particular, there is the task of optimal allocation of resources in CLOUD systems that support hybrid cloud data storage (HCSD). A special place among such tasks is the task of optimal distribution of various information flows with the aim of minimizing the cost of their passage.

The purpose of this article is to develop a method optimal distribution of several different transactions to the hybrid cloud data storage, connected by the general limitation of bandwidth.

The optimization criterion will be the minimum cost. Information flows have specific points of departure and destination, they are heterogeneous flows with common limitations on the bandwidth of the used communication channels (CC).

Let's consider the algorithm of its solution. Given a distributed computing network with a cloud component, which is characterized by an undirected, edge-weighted graph  $G = \langle Z, Y, b, c \rangle$  bandwidths of CC and the costs of transmitting a unit of information on them and the graph  $\Gamma = \langle Z, W, r \rangle$  requirements for the transfer of  $m$  information flows between nodes of a distributed computing network. Here are  $Z = \{Z_1, \dots, Z_l\}$  - renumbered set of graph vertices  $G$  and  $\Gamma$ , being in isomorphism to nodes distributed computing network,  $l = |Z|$  - number of

graph vertices  $G$  and  $\Gamma$ ;  $Y = \{y_1, \dots, y_n\}$  - renumbered set of graph edges  $G$ , are in isomorphism to CC distributed computing network,  $n = |Y|$  - number of graph edges  $G$ ;  $b: Y \rightarrow R_+$  - weight function that determines each edge  $y_i \in Y$  throughput  $b_i$ ,  $1 \leq i \leq n$ ;  $c: Y \rightarrow R_+$  - weight function that determines the cost of transferring a unit of flow  $C_i$  edgewise  $y_i \in Y$ ;  $W = \{W_1, \dots, W_m\}$  - renumbered set of graph edges  $\Gamma$ . Edge  $W_j \in W$ ,  $1 \leq j \leq m$ , connects two vertices of a graph  $\Gamma$ , if between corresponding nodes distributed computing network information is exchanged. The amount of information flow to be sent along the edge  $W_j$ , given by the weight function  $r: W \rightarrow R_+$ , defining each edge  $W_j \in W$  graph  $\Gamma$  required flow  $r_j$ . The number of information flows that need to be distributed in the network is equal to  $m = |W|$ .

Required for given graphs  $G$  and  $\Gamma$  distribute the flows in the network in such a way that, if the requirements of the graph are satisfied,  $\Gamma$  the cost of transmitting the flow in the network was minimal. To present the formal formulation and algorithm for solving this problem, we introduce a number of definitions.

Distribution  $\gamma$  flows of information transmitted to a distributed computing network defined by graphs  $G$  and  $\Gamma$ , of information flows transmitted to a distributed computing network defined by graphs  $H(\gamma)$ . Here  $R'(\gamma) = \{r'_1, \dots, r'_m\}$  - a set that establishes the volumes of transmission of information flows in the distribution  $\gamma$  between each pair of vertices for which in the graph  $\Gamma$  there is an edge. Element  $r'_j \in R'(\gamma)$  defines in distribution  $\gamma$  real flow between  $j$  - th pair of graph vertices  $\Gamma$ .  $Q(y) = \{q_1, \dots, q_n\}$  - set, each element of which  $q_i$  is the total flow along the edge  $y_i \in Y$  of graph  $G$  in distribution  $\gamma$ .  $H(\gamma) = \{H^1, \dots, H^m\}$  - set family  $H^j = \{H^j_1, \dots, H^j_{z(j)}\}$ , made up of routes where it is transmitted  $j$ -th flow in distribution  $\gamma$ . Here  $Z(j)$  - number of transmission routes  $j$ -th flow in distribution  $\gamma$ . Each route  $H^j_p$ ,  $1 \leq p \leq Z(j)$ , corresponding threesome  $\langle A^j_p, d^j_p, x^j_p \rangle$ , where

$A_p^j = \left\{ a_{1p}^j, \dots, a_{d_p^j}^j \right\}$  - a set that defines the composition of the route (in the list of edges) of the graph  $G$ , each element of which  $a_{sp}^j, 1 \leq s \leq d_p^j$ , is an edge of the set  $Y$  of the graph  $G$ ;  $d_p^j$  - route length  $H_p^j$ ;  $x_p^j$  - value  $j$ -th flow along the route  $H_p^j$ . Note that in the set  $A_p^j$  elements  $a_{sp}^j$  located according to their order of travel.

Using route parameters  $H_p^j$  define the value

$$q_i \in Q(\gamma) : \forall y_i \in Y \exists q_i = \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^{z(j)} x_p^j h_p^j,$$

where 
$$h_p^j = \begin{cases} 0, & y_i \notin A_p^j; \\ 1, & y_i \in A_p^j \end{cases}$$

and meaning  $r'_j \in R'(\gamma) : \forall W_j \in W \exists r'_j = \sum_{p=1}^{z(j)} x_p^j$ .

Let us give a formal statement of the problem. Graphs are given  $G = \langle Z, Y, b, c \rangle$  and  $\Gamma = \langle Z, W, r \rangle$ . It is required to distribute flows in the network, that is, to form sets  $R'(\gamma)$ ,  $Q(\gamma)$  and family  $H(\gamma)$  so that the value

$$F(\gamma) = \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^{z(j)} C_p^j X_p^j$$

took the minimum value under the following conditions:

- 1)  $\sum_{p=1}^{z(j)} X_p^j - R_j = r_j$ ;
- 2)  $\forall y_i \in Y \exists q_i \in Q(\gamma) \wedge b_i \in b(Y) | q_i + S_i = b_i$ ;
- 3)  $X_p^j, R_j, S_i \geq 0$ ,

where  $C_p^j$  - unit transfer cost  $j$ -th flow by  $H_p^j$  route;  $R_j, S_i$  - weak variables.

Value  $C_p^j$  is defined by the expression

$$C_p^j = \sum_{s=1}^{d_p^j} C_s,$$

where  $C_s$  - cost of transmitting a unit of information flow along an edge  $a_{sp}^j$ , included in the route  $H_p^j$ .

To solve this problem using the modified simplex - Danzig method [2] it is necessary to specify the initial admissible distribution  $\gamma_0$ , more specifically, a family of routes  $H(\gamma_0)$ . Distribution  $\gamma_0$  can be found by solving the problem of the maximum heterogeneous information flow allowed for a given network. Formally, the problem of the maximum admissible information flow can be formulated as follows.

Graphs are given  $G = \langle Z, Y, b, c \rangle$  и  $\Gamma = \langle Z, W, r \rangle$ .

Required to maximize  $\lambda = \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^{z(j)} X_p^j$  under conditions:

- 1)  $\forall y_i \in Y \exists q_i \in Q(\gamma) \wedge b_i \in b(Y) | q_i + S_i = b_i$ ;
- 2)  $X_p^j, S_i \geq 0$ .

Denote by the function  $\mu$  the share of the total required flow, which is realized in the distribution  $\gamma$ . In the course of the further presentation of the algorithm, we will use the vector form of data representation and distribution results.

Associate the functions  $b$  and  $c$  the vectors  $\tilde{b}$  and  $\tilde{c}$ , where  $\tilde{b} = (\tilde{b}_1, \dots, \tilde{b}_n, \tilde{b}_{n+1})$  - graph's edge capacity vector  $G$ ,  $\tilde{b}_1 = b_i, \tilde{b}_{n+1} = \mu$  (at the start of execution  $\tilde{b}_{n+1} = 0$ );  $\tilde{C} = (\tilde{C}_1, \dots, \tilde{C}_n)$  - cost vector (lengths) of graph edges  $G$ ,  $\tilde{C}_i = C_i$ . We also have: the identity matrix  $\bar{B}_0$  size  $(n+1) \times (n+1)$  (an additional dummy variable is introduced), wherein  $\bar{b}_{\alpha, \beta} = 1$ , if  $\alpha = \beta, 1 \leq \alpha \leq (n+1), 1 \leq \beta \leq (n+1)$ , and  $\bar{b}_{\alpha, \beta} = 0$  if  $\alpha \neq \beta$ , the matrix of the current basis  $\bar{B}^{-1}$  (at the start of the algorithm  $\bar{B}^{-1} = \bar{B}_0$ ). Distribution  $\gamma$  determined by the current simplex table (matrix  $\bar{B}^{-1}$  and vector  $\tilde{b}$ ).

The algorithm for constructing the maximum allowable flow is iterative. At each  $k$ -th iteration, the simplex table is modified.

**Step 1.** Taking the values of the vector as the length of the edges  $\tilde{c}$ , find in the graph  $G$  for each required graph flow  $\Gamma$  (edges  $W_j \in W$ ) the shortest route, for example, using the Deijkstra method [3] and not taking into account the restrictions on the bandwidth of the edges, we implement the entire flow along this route  $r_j \in r(W)$ .

Route parameters are stored in a set family  $H(\gamma_k)$ . As a result, we have the distribution of the total flow over the edges of the graph  $G$ , represented by the vector

$$\tilde{q}^k = (\tilde{q}_1^k, \dots, \tilde{q}_n^k, \tilde{q}_{n+1}^k),$$

where 
$$\tilde{q}_i^k = \sum_{j=1}^m r_j h_j \left| h_j = \begin{cases} 0, & y_i \notin A^j; \\ 1, & y_i \in A^j, \end{cases} \tilde{q}_{n+1}^k = -1,$$

$A^j$  - composition of the shortest route between the  $j$ -th pair of nodes of the graph  $\Gamma, A^j \in H(\gamma_k)$ .

Vector  $\tilde{q}^k$  entered into the simplex - table.

**Step 2.** Among the positive components of the vector  $\tilde{q}^k$  determined  $\tilde{q}_i^k$  with the minimum value of the ratio  $\tilde{b}_i^{k-1} / \tilde{q}_i^k$  (here  $\tilde{b}_i^{k-1}$  - component of the vector  $\tilde{b}^{k-1}$  the current capacities of the edges of the graph  $G$ ). Number  $i$  of the selected component determines the leading row of the simplex table. Let us formulate a new

value of the vector  $\tilde{q}^{k*}$ . To do this, we separate everything except  $\tilde{q}_i^k$  vector components  $\tilde{q}^k$  at  $(-\tilde{q}_i^k)$  (negative leading value), and set the leading value to  $1/\tilde{q}_i^k$ .

**Step 3.** Let us replace in the original identity matrix  $\bar{B}_0$   $i$ -th column vector  $\tilde{q}^{k*}$  and get the matrix  $\bar{B}_0^k$ . We can form the current simplex table, that is, we form: the matrix of the current basis  $\bar{B}_k^{-1} = \bar{B}_0^k \cdot \bar{B}_{k-1}^{-1}$  и new bandwidth vector  $\tilde{b}^k = \bar{B}_0^k \cdot \tilde{b}^{k-1}$ , in which the vector  $\tilde{q}^k$  changes the current base variable of the leading row. For the constructed flow distribution, we obtain the value of the objective function  $\mu_k = \tilde{b}_{n+1}^k$ , those share of the total required flow, which is realized in the distribution  $\gamma_k$ , defined by the current simplex tableau and family  $H(\gamma_k)$ .

If  $\mu_k \geq 1$ , then the work of the algorithm for constructing the maximum admissible flow ends here.

At  $\mu_k < 1$  from edges set  $Y$  graf  $G$  is removed edge  $y_i$ , coincider  $i$ -th the leading row of the simplex table, and the process of constructing the maximum allowable flow continues cyclically until then (steps 1 - 3), until either  $\mu_k \geq 1$ , or it will not be possible to build any route that allows you to distribute the remaining required flows  $r_j \in r(W)$  of the graf  $\Gamma$ . In the latter case, we can say that the given distributed computing network, defined by graphs  $G$  and  $\Gamma$ , allows you to distribute the required information flows of no more than  $\mu_k$  from the given value, that is

$$\forall W_j \in W \exists r_j \in r(W) \left| \sum_{p=1}^{z(j)} X_p^j \leq \mu_k \cdot r_j \right.$$

The resulting flow distribution  $\gamma_0 = \gamma_k$ , route family defined  $\mathbf{H}(\gamma_0)$  together with the bandwidth vector  $\tilde{b}$ , used to build minimum cost flows.

Initial data for solving the problem of constructing minimum cost flows: the number of simplex-table variables equal to  $(n+m+1)$  additionally, a dummy variable is introduced); graph's edge capacity vector  $\mathbf{G}$   $\tilde{f} = (\tilde{f}_1, \dots, \tilde{f}_n, \tilde{f}_{n+1}, \dots, \tilde{f}_{n+m}, \tilde{f}_{n+m+1})$ , где  $\tilde{f}_i = \tilde{b}_i$ ;  $\tilde{f}_{n+j} = -r_j$ ;  $\tilde{f}_{n+m+1} = F$  (at the start of the algorithm  $\tilde{f}_{n+m+1} = 0$ ); cost vector (lengths) of graph edges  $\mathbf{G}$   $\tilde{C} = (\tilde{C}_1, \dots, \tilde{C}_n)$ , where  $\tilde{C}_i = C_i$ ; identity matrix  $\bar{B}_0$  sizes  $(n+m+1) \times (n+m+1)$ ; current basis matrix  $\bar{B}^{-1}$  (at the start of execution  $\bar{B}^{-1} = \bar{B}_0$ ); route family  $H(\gamma_0)$ .

**Step 1.** Route family's  $\mathbf{H}(\gamma_0)$  are sequentially entered into the simplex table. The route entered into the table, for the transmission of the  $j$ -th stream, is represented by the vector  $\tilde{X}_p^j = (\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_n, \tilde{X}_{n+1}, \dots, \tilde{X}_{n+m}, \tilde{X}_{n+m+1})$ , where component  $\tilde{X}_i$  is equal to one if the corresponding index  $i$  the edge is included in this route and is equal to zero in other cases;  $\tilde{X}_{n+j} = -1$  - coefficient at  $X_p^j$  in

the equation  $R_j - \sum_{p=1}^{z(j)} X_p^j = -r_j$ ;  $\tilde{X}_{n+m+1} = C_p^j$  - unit transfer cost  $j$ -th flow along the input route. Before entering into the simplex - table vector  $\tilde{X}_p^j$  is adjusted according to the expression  $\tilde{X}_p^{jk} = \bar{B}_0^{k-1} \cdot \tilde{X}_p^j$ . Among the positive components  $i$  of the vector  $\tilde{X}_p^{jk}$  such  $\tilde{X}_i^k$ , for which the relation  $\tilde{f}_i^{k-1} / \tilde{x}_i^k$  has a minimum value. The number  $i$  of the selected component determines the leading row of the simplex table.

**Step 2.** Let's input the vector  $\tilde{X}_p^{jk}$  into the basis and form the current simplex tableau in accordance with the following procedure.

Get the new value of the vector  $\tilde{X}_p^{jk*}$ . To do this, we separate everything except  $\tilde{X}_i^k$ , vector components  $\tilde{X}_p^{jk}$  at  $(-\tilde{X}_i^k)$  (negative leading value), and set the leading value to  $1/\tilde{X}_i^k$ . Let us replace in the original identity matrix  $\bar{B}_0$   $i$ -th column vector  $\tilde{X}_p^{jk*}$  and get the matrix  $\bar{B}_0^k$ . Let's form the current simplex table (we form: the matrix of the current basis  $\bar{B}_k^{-1} = \bar{B}_0^k \cdot \bar{B}_{k-1}^{-1}$  and a new bandwidth vector  $\tilde{f}^k = \bar{B}_0^k \cdot \tilde{f}^{k-1}$ ), in which the vector  $\tilde{X}_p^{jk}$  changes the current base variable of the leading row. For the constructed flow distribution, we obtain the value of the objective function  $F(\gamma_k) = \tilde{f}_{n+m+1}^k$ , which determines the cost of transferring information flows in the distribution  $\gamma_k$ . After finishing entering the routes included in the family  $H(\gamma_0)$ , determining the initial basic distribution of information flows, the basic flows are redistributed in order to minimize the functional  $F$ .

**Step 3.** Components are analyzed  $(n+m+1)$ -th row of the matrix of the current basis  $\bar{B}_k^{-1}$ . If among the analyzed components  $\bar{b}_{i+r}^k, 1 \leq t \leq (n+m+1)$ , there are components with a value less than zero, then from  $\bar{b}_{i+r}^k < 0$  choose a component  $\bar{b}_{i+r}^k, 1 \leq r \leq (n+m+1)$ , satisfying the condition  $\bar{b}_{i+r}^k = \min_t \bar{b}_{i+r}^k < 0$ . Column  $r$  - leading.

To enter the leading column into the basis, in order to minimize  $F$ , among the components  $\bar{b}_{t,r}^k > 0$  find such  $\bar{b}_{a,r}^k, 1 \leq a \leq (n+m+1)$ , for which the relation  $\tilde{f}_{t,r}^k / \bar{b}_{t,r}^k$  takes the minimum value,  $\tilde{f}_{a,r}^k / \bar{b}_{a,r}^k = \min_t (\tilde{f}_{t,r}^k / \bar{b}_{t,r}^k)$ . Line  $a$  - leading. Let's form new component values  $\bar{b}_{t,r}^{k*}$  the leading column of the matrix  $\bar{B}_k^{-1}$ . To do this, we separate everything except  $\bar{b}_{a,r}^k$  components  $\bar{b}_{t,r}^k$  at

$(-\bar{b}_{a,r}^k)$  (negative value of the leader), and the value of the leader will be set equal to  $1/\bar{b}_{a,r}^k$ .

**Step 4.** Let us replace in the original identity matrix  $\bar{B}_0$   $a$ -th column to newly formed column  $\mathbf{r}$  matrix  $\bar{B}_k^{-1*}$  and get the matrix  $\bar{B}_0^{k+1}$ . Now we can form the current simplex table, that is, we form the matrix of the current basis  $\bar{B}_{k+1}^{-1} = \bar{B}_0^{k+1} \cdot \bar{B}_k^{-1}$  and a new bandwidth vector  $\tilde{f}^{k+1} = \bar{B}_0^{k+1} \cdot \tilde{f}^k$ , in which the pivot row base variable  $a$  is replaced by the pivot column variable  $r$ . For the constructed flow distribution, we obtain a new value of the objective function

$$F(\gamma_{k+1}) = \tilde{f}_{n+m+1}^{k+1}.$$

If in the resulting distribution  $\gamma_{k+1}$  в  $(n+m+1)$ -th line has at least one component  $\bar{b}_{n+m+1,t}^{k+1}$  with a value less than zero, then the operation of the algorithm is repeated, starting from step 3. If the components  $\bar{b}_{n+m+1,t}^{k+1} \geq 0$ , then the vector is formed  $\tilde{C}^* = [\tilde{C}_1^*, \dots, \tilde{C}_n^*]$  the current cost of transferring a unit of information flow for each edge of the set  $Y$  graf  $G$ ,  $\tilde{C}_i^* = \tilde{C}_i + \bar{b}_{n+m+1,i}^{k+1}$ . Taking as the length of the edges the value of the vector  $\tilde{C}^*$ , find in the graph  $G$  for each required stream  $j$  graph  $\Gamma$  the shortest route, for example, using Deijkstra's method.

Found route  $H_{p+1}^j$  represented by a vector

$$\tilde{X}_{p+1}^j = (\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n, \tilde{x}_{n+1}, \dots, \tilde{x}_{n+m}, \tilde{x}_{n+m+1}).$$

Then if  $H_{p+1}^j \in H(\gamma_0)$ , then the optimal solution to the problem of constructing minimum cost flows is obtained and the algorithm ends, otherwise the route found  $H_{p+1}^j$  is introduced into the route family  $H(\gamma_0)$  and the process of constructing the minimum cost flows continues from the step 1. Resulting optimal distribution  $\gamma = \gamma_{k+1}$  defined by family routes  $H(\gamma)$ , sets  $R'(\gamma)$ ,  $Q(\gamma)$  and defined by family routes  $F(\gamma)$ .

## Conclusions

The article proposes a method for splitting transactions to a hybrid cloud data warehouse.

The method is based on the construction of network graphs.

The optimization problem is reduced to the distribution of flows in the network in such a way that, if the requirements of the cloud hybrid data storage are met, the cost of transmitting the flow in the network is minimal. To solve it, an iterative algorithm for constructing the maximum admissible flow is proposed. At each iteration, the simplex table of network graphs is modified.

The direction of further research is the development of a method for optimizing the structure of cloud data storage.

## REFERENCES

1. Широкова Е.А. Облачные технологии / Е.А. Широкова // Современные тенденции техн. наук: мат. межд. науч. конф.; Уфа, 2011 г. – Уфа: Лето, 2011. – С. 30 – 33.
2. Риз Д. Облачные вычисления [Текст] / Джордж Риз. – СПб.: 2011. – 288 с.
3. Google Cloud Platform [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cloud.google.com>. – 12.04.2013.
4. 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>.
5. Кучук Г.А. Управление ресурсами инфотелекоммуникаций : монография / Г.А. Кучук, Р.П. Гахов, А.А. Пашнев. – М.: Физматлит, 2006. – 220 с.
6. 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», 2013. – 264 с. – ISBN 978-617-7188-18-5.
7. 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>
8. Саймак А. Обработка транзакций / А. Саймак // СУБД. – 1997. – № 2. – С. 70 - 82.
9. Сергиенко И.В. Модели и методы решения на ЭВМ комбинаторных задач оптимизации / И.В. Сергиенко, М.Ф. Каспишская. – К.: Наук. думка, 1981. – 287 с.

Received (Надійшла) 04.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.11.2022

## Метод розподілу транзакцій до гібридного хмарного сховища даних

Н. Г. Кучук, А. П. Шиман

**Анотація.** У статті розглянуто **актуальне завдання** оптимального розподілу ресурсів у CLOUD-системах, котрі підтримують гібридні хмарні сховища даних. **Метою даної статті** є розробка методу оптимального розподілу кількох різнорідних транзакцій до гібридного хмарного сховища даних, пов'язаних загальним обмеженням пропускних здібностей. Критерієм оптимізації буде мінімальна вартість. Інформаційні потоки мають певні пункти відправлення та призначення, є різнорідними потоками із загальними обмеженнями на пропускні здібності каналів зв'язку, що використовуються. Отримані результати. Метод ґрунтується на побудові мережних графів. Завдання оптимізації зводиться до розподілу потоків у мережі таким чином, щоб при задоволенні вимог хмарного гібридного сховища даних вартість передачі потоку в мережі була мінімальною. Для її вирішення запропоновано ітераційний алгоритм побудови максимального допустимого потоку. На кожній ітерації проводиться модифікація симплексної таблиці зв'язку мережних графів. Напрямок подальших дослідів – розробка методу оптимізації структури гібридного хмарного сховища даних

**Ключові слова:** хмарні технології, сховище даних, гібридність, CLOUD-система, мережний граф.

С. А. Микусь, С. І. Васюхно

Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

## МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ІМОВІРНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФІКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ УРАЖЕНИХ ОБ'ЄКТІВ

**Анотація. Актуальність.** Через суттєву нерівномірність вхідного трафіка системи моніторингу стану уражених об'єктів виникає необхідність здійснення швидкого короткочасного прогнозу поведінки трафіка по невеликій кількості відліків, тобто визначення його основних ймовірнісних характеристик. **Мета статті:** розробка методу, що дозволяє провести оцінку функції щільності розподілу трафіка системи моніторингу стану уражених об'єктів, використовуючи задану вибірку, розширену мажорантою функції розподілу, і порівняти цей метод з тими, що існують, при різних варіантах формування мережного трафіка. **Отримані результати.** побудована мажоранта функції розподілу трафіка по його поточних відліках; запропонована оцінка функції щільності розподілу трафіка; проведений порівняльний аналіз отриманої оцінки функції щільності розподілу трафіка. **Висновок.** Запропонований метод дає точнішу і стійкішу оцінку, ніж існуючі методи. Він є ефективнішим при аналізі трафіка з тривалими пульсаціями, а також трафіка з довготривалою залежністю, що притаманний центру обробки даних моніторингу стану уражених об'єктів.

**Ключові слова:** моніторинг, трафік, уражений об'єкт, функція щільності розподілу, мажоранта.

### Вступ

Головною вимогою, що ставиться до сучасних систем моніторингу стану уражених об'єктів, є оперативна обробка даних, що надходять з різних джерел: літальних апаратів, що здійснюють зйомку місцевості, космічних знімків, відрізаних датчиків, інформації щодо об'єктів до моменту ураження тощо [1]. Агрегований з різних джерел трафік, який в цей час надходить до центру обробки даних, є істотно нерівномірним, з тривалими пульсаціями. Отже, виникає необхідність здійснення швидкого короткочасного прогнозу поведінки трафіка по невеликій кількості відліків, тобто визначення його основних ймовірнісних характеристик.

Дослідження ймовірнісних характеристик поточного трафіка проведене в різних роботах, наприклад [2–4]. Одним з найчастіше використовуваних підходів до їхнього визначення є отримання оцінки функції щільності розподілу трафіка системи моніторингу стану ураженого об'єкту, що створюється потоками даних в базовій мережі відповідної комп'ютерної системи. Найчастіше для цього використовується класична парзенівська оцінка з експоненціальним ядром [5]. Останнім часом почали використовуватися парзенівська оцінка з гаусівським ядром [6] і оцінка Спанечнікова, що використовує метод стохастичної регуляризації.

Проте багато авторів відзначають [5, 6], що навіть незначні зміни параметра Херста при парзенівській оцінці (а вони зазвичай є наслідком наявності довготривалих пульсацій трафіку або «важких хвостів» розподілу трафіку з довготривалою залежністю – ДТЗ-трафіка) можуть привести до істотних відхилень від реального трафіку. Використання параметрів регуляризації  $\alpha_n$ , що динамічно настроюються, при стохастичній регуляризації частково вирішує дане питання, проте істотно погіршує оцінку функції щільності розподілу трафіка при малих вибірках.

Оскільки трафік системи моніторингу стану уражених об'єктів більшою мірою формується джерелами з тривалими пульсаціями і у багатьох випадках

володіє довготривалою залежністю, то усунення вказаних недоліків використовуваних методів даної оцінки є актуальним завданням.

Отже метою даної статті є розробка методу, що дозволяє провести оцінку функції щільності розподілу трафіка системи моніторингу стану уражених об'єктів, використовуючи задану вибірку, розширену мажорантою функції розподілу, і порівняти цей метод з тими, що існують, при різних варіантах формування мережного трафіка. Для цього пропонується вирішити такі часткові завдання: 1) побудувати по відліках мажоранту функції розподілу трафіка; 2) знайти оцінку функції щільності розподілу трафіка; 3) провести порівняльний аналіз отриманої оцінки функції щільності розподілу трафіка.

### 1. Побудова мажоранти функції розподілу трафіка

Розглянемо вибірку з  $n$  відліків трафіка, тобто послідовно розташованих значень часів надходження пакетів трафіка  $\mathfrak{T}^* = (t_1^*, t_2^*, \dots, t_n^*)$ . Для оцінки щільності розподілу ймовірності часів зазвичай будується ступінчаста емпірична функція розподілу  $F_n^*(t)$  з величиною підйому, що дозволяє отримати наближення шуканої функції  $f_n^*(t)$ . Проте відмічено [6], що при такому підході отримувані оцінки значно розходяться з щільністю ймовірності розподілу надходжень реального трафіку за наявності «важких хвостів» або тривалих пульсацій, що є характерним для трафіка системи моніторингу стану уражених об'єктів

Перейдемо при побудові  $F_n^*(t)$  від кусочно-безперервної до безперервної емпіричної функції розподілу. Для цього побудуємо мажоранту  $F_n^{(M)}(t)$  для  $F_n^*(t)$ , виконавши нижчеописані дії.

1. Побудуємо нове розбиття досліджуваного часового інтервалу, в якому точки розбиття визначаються таким чином:



$$t_0^{(M)} = 2t_1^{(*)} - t_2^{(*)};$$

$$t_i^{(M)} = \frac{t_{i-1}^{(*)} + t_i^{(*)}}{2} \text{ при } i \in \overline{1, n-1}; \quad t_n^{(M)} = t_n^{(*)}.$$

2. Визначимо значення мажоранти в точках розбиття  $\tau^{(M)}$ :

$$F_n^{(M)}(t_0^{(M)}) = 0; \quad F_n^{(M)}(t_i^{(M)}) = \frac{2i+1}{2n}.$$

3) побудуємо лінійний сплайн, що проходить через точки  $F_n^{(M)}(t_i^{(M)})$ ,  $F_n^*(t_i^*)$ , який і визначить шукану мажоранту

$$F_n^{(M)}(t) = \frac{1}{n} \sum_{l=0}^{n-1} \left( l + \frac{t-t_l^{(M)}}{t_{l+1}^{(M)} - t_l^{(M)}} \right) \times \left( \Theta(t-t_l^{(M)}) - \Theta(t-t_{l+1}^{(M)}) \right) + \Theta(t-t_n^{(M)}), \quad (1)$$

де  $\Theta(\bullet)$  – функція Хевісайда.

При  $n \rightarrow \infty$  функції  $F_n^{(M)}(t)$  сходяться до функції розподілу реального трафіку, тобто

$$P\left(\sup_t \left(F_n^{(M)}(t) - F(t)\right) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0\right) = 1. \quad (2)$$

Істинність умови (2) виходить з того, що

$$\sup \left| F_n^{(M)}(t) - F(t) \right| \leq \sup \left| F_n^*(t) - F(t) \right| + \frac{1}{n},$$

тобто з можливості застосування у даному випадку леми Бореля-Кантеллі [7].

## 2. Знаходження оцінки функції щільності розподілу трафіка

Виходячи з (2) можна припустити, що щільність ймовірності досліджуваного реального трафіку  $f(t) \in L_2(-\infty; +\infty)$  і шукати її можна з умови [7]:

$$F(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\Theta(t-x)dx, \quad (3)$$

тобто  $f(t)$  – вирішення інтегрального рівняння Фредгольма першого роду, що не є стійким щодо малих змін  $F(t)$ . Використовуємо для його вирішення метод регуляризації Тіхонова [8], що полягає в тому, що з послідовностей  $F_n^{(M)}(t)$  будується послідовність функцій  $f_n^{(M)}(t)$ , що мінімізує функціонал

$$\Phi(f, F_n^{(M)}) = \left\| \aleph f - F_n^{(M)} \right\|_{L_2}^2 + \alpha_n \Omega(f), \quad (4)$$

де  $\aleph: \{f_i\} \rightarrow \{F_i\}$  – оператор, що здійснює взаємно-однозначне відображення відповідних функціональних просторів;  $\|\bullet\|_{L_2}$  – метрика в  $L_2(-\infty; +\infty)$ ;  $\alpha_n$  –

константа регуляризації;  $\Omega(f)$  – стабілізуючий функціонал, що набуває в області визначення невід’ємних значень, для якого виконана умова компактності:

$$\forall M_c \mid \left( M_c = \{ \phi : \Omega(\phi) \leq C \}; C \geq 0 \right). \quad (5)$$

Виходячи з (3) визначимо  $\aleph$  як

$$\aleph f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\Theta(t-x)dx, \quad (6)$$

а  $\Omega(f) = \|f(t)\|_{L_2}^2$  згідно [9].

Для знаходження мінімуму  $\Phi(f, F_n^{(M)})$

знайдемо похідну Фреше по  $f(t)$  в  $L_2(-\infty; +\infty)$ :

$$\begin{aligned} & \Phi(f + \Delta f) - \Phi(f) = \\ & = \left\| \aleph f(t) + \aleph \Delta f(t) - F_n^{(M)}(t) \right\|_{L_2}^2 + \|f(t) + \Delta f(t)\|_{L_2}^2 \times \\ & \times \alpha_n - \left\| \aleph f(t) - F_n^{(M)}(t) \right\|_{L_2}^2 - \alpha_n \|f(t)\|_{L_2}^2 = \\ & = \left\| \aleph f(t) - F_n^{(M)}(t) \right\|_{L_2}^2 + \left\| \aleph \Delta f(t) \right\|_{L_2}^2 + \\ & + 2\left( \aleph f(t) - F_n^{(M)}(t), \aleph \Delta f(t) \right) + \\ & + \alpha_n \|f(t)\|_{L_2}^2 + \alpha_n \|\Delta f(t)\|_{L_2}^2 + 2\alpha_n (f(t), \Delta f(t)) - \\ & - \left\| \aleph f(t) - F_n^{(M)}(t) \right\|_{L_2}^2 - \alpha_n \|f(t)\|_{L_2}^2 = \\ & = 2\left( \aleph f(t) - F_n^{(M)}(t), \aleph \Delta f(t) \right) + 2\alpha_n (f(t), \Delta f(t)) = \\ & = 2\left( \left( \aleph^* \left( \aleph f(t) - F_n^{(M)}(t) \right) + \alpha_n f(t) \right), \Delta f(t) \right) + \\ & + o(f(t)), \end{aligned}$$

де  $\aleph^*$  – оператор, зв'язаний з  $\aleph$ .

Отже, мінімум функціонала  $\Phi(f, F_n^{(M)})$  досягається на тих функціях  $f(t)$ , які задовольняють тождество

$$\aleph^* \left( \aleph f(t) - F_n^{(M)}(t) \right) + \alpha_n f(t) \equiv 0. \quad (7)$$

Після підстановки (7) в (6) отримаємо

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Theta(x-t) \left( \int_{-\infty}^{+\infty} \Theta(x-\chi) f(\chi) d\chi - F_n^{(M)}(t) \right) dx + \alpha_n f(t) \equiv 0. \quad (8)$$

Застосуємо до (8) узагальнене перетворення Фур'є [10]:

$$\begin{aligned} & (-1/ix + \pi\delta(x)) \cdot (1/ix + \pi\delta(x)) f(x) - \\ & - F_n^{(M)}(t) + \alpha_n f(x) = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

де 
$$F_n^{(M)}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} F_n^{(M)}(t) e^{-itx} dt;$$

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-ix\chi} d\chi;$$

$\delta(x)$  – дельта-функція Дірака.

Після перетворення аналітичного виразу мажоранти (1) отримаємо

$$F_n^{(M)}(t) = \frac{1}{n} \sum_{l=0}^{n-1} \left( l - \frac{t_l^{(M)}}{t_{l+1}^{(M)} - t_l^{(M)}} \right) \times$$

$$\times \left( \Theta(t - t_l^{(M)}) - \Theta(t - t_{l+1}^{(M)}) \right) + \Theta(t - t_n^{(M)}) +$$

$$+ \frac{1}{n} \sum_{l=0}^{n-1} \frac{t}{t_{l+1}^{(M)} - t_l^{(M)}} \cdot \left( \Theta(t - t_l^{(M)}) - \Theta(t - t_{l+1}^{(M)}) \right). \quad (10)$$

Отримавши перетворення Фур'є для функції Хевісайда [10]:

$$\hat{\Theta}(t - \beta) = \pi\delta(t) - \frac{ie^{-it\beta}}{t};$$

$$t\hat{\Theta}(t - \beta) = i \left( \pi\delta(1-t) + \frac{ie^{-it\beta}}{t^2} - \frac{\beta e^{-it\beta}}{t} \right),$$

можемо записати перетворення Фур'є  $F_n^{(M)}(t)$ , використовуючи вираз (10):

$$F_n^{(M)}(x) = \frac{i}{nx} \sum_{l=0}^{n-1} \left( e^{-ixt_{l+1}^{(M)}} - e^{-ixt_l^{(M)}} \right) \times$$

$$\times \left( l - i / \left( t(t_{l+1}^{(M)} - t_l^{(M)}) \right) \right) +$$

$$+ \frac{i}{nx} \sum_{l=0}^{n-1} e^{-ixt_{l+1}^{(M)}} + \pi\delta(x) - (i/x) \cdot e^{-ixt_n^{(M)}}. \quad (11)$$

Підставивши (11) в (9) отримаємо

$$\left( -\frac{1}{ix} + \pi\delta(x) \right) \left( -\frac{1}{ix} f(x) + \pi\delta(x) \times$$

$$\times \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-itx} dt - \frac{1}{n} \sum_{l=0}^{n-1} \frac{i}{x} \left( e^{-ixt_{l+1}^{(M)}} - e^{-ixt_l^{(M)}} \right) \right) \quad (12)$$

$$\times \left( l - i / \left( x(t_{l+1}^{(M)} - t_l^{(M)}) \right) \right) + \alpha_n f(x) -$$

$$- \frac{1}{n} \sum_{l=1}^{n-1} \frac{i}{x} e^{-ixt_{l+1}^{(M)}} - \pi\delta(x) + \frac{i}{x} e^{-ixt_n^{(M)}} \Big) = 0.$$

Оскільки для дельта-функції Діраку і функції щільності розподілу ймовірності вірно [10]:

$$f(x)\delta(x) = f(0)\delta(x);$$

$$\pi f(x)\delta(x) = \pi\delta(x),$$

то після відповідних перетворень і множення на  $x^2$  вираз (12) набирає такого вигляду:

$$f(x) - i\pi\delta(x)f(x) + \alpha_n \pi x^2 f(x) +$$

$$+ \frac{1}{n} \left( \frac{1}{ix} + \pi\delta(x) \right) \times \left[ \sum_{l=1}^{n-1} \xi_l e^{-ixt_l^{(M)}} + \right. \quad (13)$$

$$\left. + \left( \frac{e^{-ixt_n^{(M)}}}{t_n^{(M)} - t_{n-1}^{(M)}} - \frac{e^{-ixt_0^{(M)}}}{t_1^{(M)} - t_0^{(M)}} \right) \right] = 0,$$

де 
$$\xi_l = \frac{1}{t_l^{(M)} - t_{l-1}^{(M)}} - \frac{1}{t_{l+1}^{(M)} - t_l^{(M)}}.$$

Використовуючи властивості дельта-функції, знайдемо з (13)  $\hat{f}(x)$ :

$$f(x) = -\frac{1}{inx(1 + \alpha_n x^2)} \times$$

$$\times \left( \sum_{l=1}^{n-1} \xi_l \cdot e^{-ixt_l^{(M)}} + \frac{e^{-ixt_n^{(M)}}}{t_n^{(M)} - t_{n-1}^{(M)}} - \frac{e^{-ixt_0^{(M)}}}{t_1^{(M)} - t_0^{(M)}} \right). \quad (14)$$

Після застосування зворотного перетворення Фур'є отримаємо рішення (8) в такому вигляді:

$$f(t) \rightarrow f_n(t) =$$

$$= \frac{1}{2n} \left( \sum_{l=0}^{n-1} \text{sign}(t - t_l^{(M)}) \xi_l \times \exp\left( \left| t - t_l^{(M)} \right| / \sqrt{\alpha_n} \right) + \right.$$

$$+ \frac{\exp\left( \left| t - t_0^{(M)} \right| / \sqrt{\alpha_n} \right) \cdot \text{sign}(t - t_n^{(M)})}{t_n^{(M)} - t_{n-1}^{(0)}} -$$

$$- \frac{1}{t_1^{(M)} - t_1^{(0)}} \exp\left( \left| t - t_0^{(M)} \right| / \sqrt{\alpha_n} \right) \times$$

$$\left. \times \text{sign}(t - t_n^{(M)}) + 2 \sum_{l=0}^{n-1} \frac{\theta(t_{l+1}^{(M)} - t) - \theta(t_l^{(M)} - t)}{t_{l+1}^{(M)} - t_l^{(M)}} \right). \quad (15)$$

### 3. Аналіз оцінки функції щільності розподілу відліків трафіка

Для аналізу якості отриманої оцінки було проведено дослідження трьох різних видів трафіка протягом фіксованого часового проміжку:

- еластичного трафіку (рис. 1, а);
- трафіку з тривалими пульсаціями (рис. 1, б);
- трафіку з «важким» статечним хвостом розподілу (рис. 1, в).

Функція щільності розподілу трафіка будувалася з використанням таких способів (відмічені цифрами на рисунках):

- 1) класичної парзенівської оцінки з експоненціальним ядром [5];
- 2) парзенівської оцінки з гаусовим ядром [6];
- 3) оцінки Еланечнікова з використанням методу стохастичної регуляризації [11];
- 4) отримана у роботі оцінка.

Коефіцієнт  $k$  на рис. 1 показує, у скільки разів парзенівської оцінки. оцінка конкретного чину відрізняється від класичної

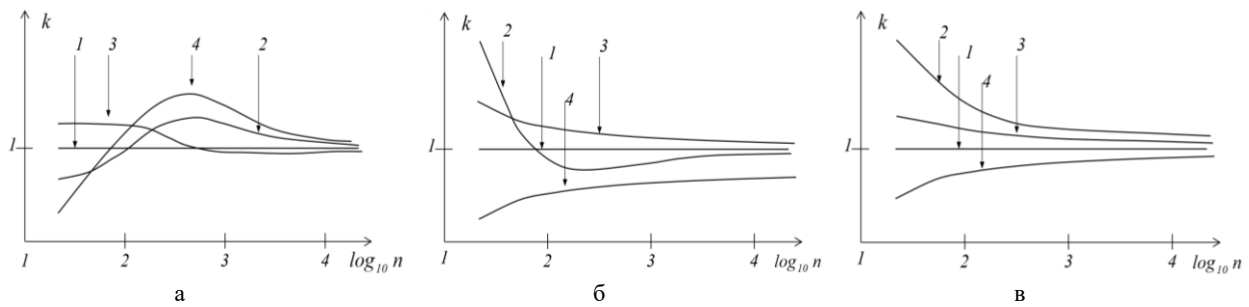


Рис. 1. Порівняльний аналіз оцінок щільності розподілу трафіка

## Висновки

Запропонований метод оцінки функції щільності розподілу трафіка, створеного інформаційними джерелами системи моніторингу стану уражених об'єктів, що використовує розширення об'єму вибірки за рахунок безперервної мажоранти функції

розподілу при малих вибірках (до 50 значень) дає точнішу і стійкішу оцінку, ніж існуючі методи. Він є ефективнішим при аналізі трафіка з тривалими пульсаціями, а також трафіка з довготривалою залежністю, що притаманний центру обробки даних моніторингу стану уражених об'єктів у перші години після ураження об'єктів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sofina, Natalia; Ehlers, Manfred; Michel, Ulrich. Object-based detection of destroyed buildings based on remotely sensed data and GIS. *The International Society for Optical Engineering*, 2011, vol. 8181, 87385/ DOI: <https://doi.org/10.1117/12.898469>
2. Davydov, Boris, Chebotarev, Vladimir, Kablukova, Kseniya: Evolution of Probabilistic Characteristics in the Train Traffic Process. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, Vol. 352, pp. 101–109. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-91156-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91156-0_8)
3. Татарнікова, Т. М., Вольський А. В. Оцінка можливо-часових характеристик мережних вузлів з диференціацією трафіка. *Інформаційно-керуючі системи*, 2018, № 3(94), pp. 54–60.
4. Кучук Г. А. Метод оцінки характеристик АТМ-трафіка. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2003. № 6 (44). С. 25-29.
5. Vapnik V. Estimation of Dependences based on Empirical Data. N.-Y., Berlin : Springer – Verlag, 1987. 326 p.
6. Silverman B.W. Choosing the window width when estimating a density. *Biotechnika*. 1988. V. 65, № 1. P. 1–11.
7. Xing, Viktoria. Dynamical Borel–Cantelli lemmas. *Discrete and Continuous Dynamical Systems*, 2022, Vol. 41, Is. 4, pp. 1737–1754. DOI: <https://doi.org/10.3934/dcds.2020339>
8. . Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. (2018), “Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study”, Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018, pp. 593-597, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>
9. Eramili A., Narayan, O., Willinger W. Experimental queuing analyzes with long-range dependent packet traffic. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 1996. V.4. P. 209–223.
10. Kovalenko, A., Kuchuk H. Methods for synthesis of informational and technical structures of critical application object's control system, *Advanced Information Systems*, 2018, Vol. 2, No. 1, pp. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
11. Moraes, Caroline P.A., Fantinato, Denis G., Neves, Aline. Epanechnikov kernel for PDF estimation applied to equalization and blind source separation. *Signal Processing*, 2021, Vol. 189, 108251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2021.108251>

Received (Надійшла) 22.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.11.2022

## The method of determining the probabilistic characteristics of the monitoring system traffic of the affected objects

S. Mykus, S. Vasyukhno

**Abstract. Topicality.** Due to the incoming traffic of the monitoring system, the condition of the affected objects is significantly uneven. Therefore, there is a need to make a quick short-term forecast of traffic behavior based on a small number of counts. Such a forecast will allow determining the main probabilistic characteristics of traffic. **The purpose of the article** is to develop a method that allows you to estimate the density function of the traffic distribution of the system for monitoring the condition of affected objects. The assessment is carried out on a given sample. The sample is expanded by the majorant of the distribution function. **The following results** were obtained. The majorant of the traffic distribution function based on its current counts is constructed. Proposed estimation of traffic distribution density function. A comparative analysis of the obtained estimate of the traffic distribution density function was carried out. **Conclusion.** The proposed method provides a more accurate and stable estimate than existing methods. It is more efficient when analyzing traffic with long ripples, as well as traffic with long dependencies. Such a traffic is inherent in the data processing center for monitoring the state of affected objects.

**Keywords:** monitoring, traffic, affected object, distribution density function, majorant.

М. І. Мосольд, Є. В. Мелешко, М. С. Якименко, Д. В. Бащенко

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

## ПРОГРАМНЕ ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕПІДЕМІЙ ЗАСОБАМИ МОВИ PYTHON ТА ПАКЕТУ ІНСТРУМЕНТІВ EPIMODEL ДЛЯ МОВИ R

**Анотація.** Метою даної роботи було створення програмного забезпечення для імітаційного моделювання епідемій та дослідження можливостей мови Python і пакету інструментів EpiModel для мови R при вирішенні даної задачі. Моделювання процесів поширення та прогнозування наслідків епідемій як інфекційних, так і інформаційно-психологічних є важливою науково-практичною задачею у наш час. Існують підходи та поради щодо моделювання епідемій, а також інструменти, за допомогою яких можна спростити шлях до досягнення потрібної мети. Епідемічні моделі поділяють на два основні види: стохастична модель та детермінована модель. Найбільш відомі математичні моделі епідемій – SI, SIR та SIS. Було розроблено програмну імітаційну модель епідемій засобами мови Python та пакету інструментів EpiModel для мови R. Тестувалася модель на прикладі поширення інфекційних захворювань, хоча також може бути використана для моделювання поширення інформаційно-психологічних впливів. Було досліджено можливості мови програмування Python та пакету інструментів EpiModel мови R для імітаційного моделювання епідемій. Дослідження показало, що дані мова програмування та пакет інструментів дають усі необхідні засоби для розробки програмної моделі епідемій. Python дозволяє швидко розробляти програми для аналізу даних, Qt Designer дає можливість створити зручний графічний інтерфейс користувача для застосунків на мові Python, а пакет інструментів EpiModel дозволяє реалізувати найбільш поширені математичні моделі епідемій, зокрема, SI, SIR та SIS. Структура соціальної мережі у даній моделі не генерувалася, а завантажувалася з частини віртуальної соціальної мережі, що прискорило розробку, а мова програмування Python дозволила за допомогою своїх інструментів та бібліотек створити парсер та взаємодію з API потрібного веб-ресурсу. Також було проведено серію експериментів з різними параметрами моделі для перевірки її працездатності та отримано очікувані результати моделювання.

**Ключові слова:** програмна модель, імітаційне моделювання, епідемії, вірусна епідемія, інформаційна епідемія, Python, EpiModel

### Вступ

Моделювання процесів поширення та прогнозування наслідків епідемій як інфекційних, так і інформаційно-психологічних є важливою науково-практичною задачею у наш час.

Існують підходи та поради щодо моделювання епідемій, а також інструменти, за допомогою яких можна спростити шлях до досягнення потрібної мети. Епідемічні моделі поділяють на два основні види: стохастична модель та детермінована модель.

*Стохастична модель* – це математична модель, в якій параметри, характеристики стану об'єкта моделювання і умови його функціонування, представлені випадковими величинами і пов'язані випадковими, непостійними залежностями; або вихідна інформація також представлена стохастичними величинами [1].

Отже, характеристики стану об'єкта в моделі визначаються не однозначно, а через закони розподілу їх ймовірностей. Моделюються стохастичні процеси в теорії масового обслуговування, а застосовуються в мережевому плануванні та управлінні і в інших областях. При побудові такої моделі найчастіше застосовуються методи регресійного і кореляційного аналізу.

*Детерміновані моделі*, як правило, призначені для поглиблення в певний основний механізм або природний процес. Вони відрізняються від статистичних моделей (наприклад, лінійної регресії), метою яких є практично оцінити відносини між змінними. Детермінована модель розглядається як корисне наближення до дійсності, яку простіше побудувати і інтерпретувати, ніж стохастичну. Проте, такі моделі

можуть бути надзвичайно складними через велику кількість вхідних і вихідних даних, і, отже, часто незворотними; фіксований єдиний набір вихідних даних може бути отриманий за допомогою декількох наборів вхідних [2].

Таким чином, використання надійних параметрів і невизначеності моделі є вирішальними можливо, навіть більшою мірою, ніж для стандартних статистичних моделей.

У математичному моделюванні, детерміновані моделі не містять випадкових величин і ступеню випадковості, і в основному складаються з рівнянь, наприклад, диференціальних. Ці розрахунки мають відомі вхідні дані і вони стають наслідком унікального набору вихідних, на протигагу стохастичному моделюванню, яке містять в собі випадкові змінні.

Детерміновані моделі використовують в наукових дослідженнях, які можна знайти в різних дослідженнях: в сфері демографічних досліджень, розвитку клімату, забруднення навколишнього середовища, а також в інших областях, як інженерія, хімія і ведення політики.

Детерміновані моделі отримали увагу в літературі по статистиці під загальною темою комп'ютерних експериментів. Комп'ютерні експерименти моделюють складні системи, що вимагають певної кількості вхідних даних. Використання стохастичної системи набагато дешевше, але є неточним і спрощеним способом.

Метою даної роботи було створення програмного забезпечення для імітаційного моделювання епідемій та дослідження можливостей мови Python і пакету інструментів EpiModel для мови R при вирішенні даної задачі.

## Основна частина

У якості існуючого інструменту для моделювання епідемій у даній роботі було розглянуто програмне забезпечення EpiModel.

EpiModel – це набір програмних інструментів для моделювання математичних моделей, динаміки інфекційних захворювань. Класи епідемічних моделей включають детерміновані компартментні моделі, стохастичні моделі індивідуального контакту та стохастичні моделі мережі. Мережеві моделі використовують надійні статистичні методи моделей випадкових графіків експоненціальних сімей (ERGM) із набору програм Statnet. Стандартні шаблони для моделювання епідемій включають такі типи захворювань: SI, SIR та SIS. EpiModel має простий API для розширення цих шаблонів для вирішення нових цілей наукових досліджень [3].

Для моделювання поширення інфекційних захворювань може використовуватися класична модель SIR. Населення в моделі ділиться на три частини в залежності від статусу: сприйнятливий до захворювання, заражений і одужавший. Ця модель створена методом системної динаміки. Щоб відображати дійсність, модель повинна ґрунтуватися на реальних властивостях конкретної хвороби і враховувати зміни системи під зовнішніми впливами.

Для розробки програмної імітаційної моделі було вирішено обрати інтерпретовану мову програмування Python. У зв'язку із стрімким розвитком персональної обчислювальної техніки, відбувається поступова зміна вимог до мов програмування. Все більшу роль починають грати інтерпретовані мови, оскільки зростає потужність персональних комп'ютерів починає забезпечувати достатню швидкість виконання інтерпретованих програм. А чи не єдиною суттєвою перевагою компільованих мов програмування є створений ними високошвидкісний код. Інтерпретована мова є найбільш простим і гнучким інструментом програмування, що має дуже високий рівень портативності розроблених програмних засобів. Python – це універсальна сучасна мова програмування високого рівня, до переваг якої відносять високу продуктивність програмних рішень і структурований код. Ядро має дуже зручну структуру, а широкий перелік вбудованих бібліотек дозволяє застосовувати значний набір корисних функцій і можливостей. Python може підтримувати широкий перелік стилів розробки застосунків, в тому числі, дуже зручний для роботи з об'єктно-орієнтованою та функціональною парадигмами програмування [4].

Для створення графічного інтерфейсу користувача було використано Qt Designer [5]. Він дозволяє створювати графічні інтерфейси за допомогою ряду наступних інструментів. Існує панель інструментів, в якій доступні для використання багато різноманітних елементів інтерфейсу. Кожен віджет має свій набір властивостей, що визначається відповідним йому класом бібліотеки Qt. Характерною особливістю Qt Designer є підтримка візуального редагування сигналів і слотів. Qt Designer дозволяє швидко спроектувати віджети і діалоги, використовуючи екран-

ні форми з використанням тих же віджетів, які будуть використовуватися в застосунку. Форми, створені з Qt Designer, є повністю функціональними, а також можуть бути переглянуті в режимі реального часу. Розроблений інтерфейс зберігається в файл з розширенням ui, який підключається до створюваної програми за допомогою спеціальних методів бібліотеки Qt. Цей файл має xml-формат, і може, в разі необхідності, редагуватися в будь-якому текстовому редакторі.

Не можливо уявити великі сучасні застосунки без зручного та дружнього до звичайного користувача інтерфейсу. Хороший користувацький інтерфейс охарактеризувати нескладно: такий інтерфейс простий у використанні. Для створення графічного інтерфейсу користувача на мові програмування Python, найбільш доцільним є використання Qt Designer в парі з PyQt 5. А для того, щоб швидко та гарно зображувати графіки, кращим вибором є PyQtGraph.

Для зберігання даних моделювання та прогнозування наслідків епідемії можна використовувати SQLite. Вона не вимагає великої потужності персонального комп'ютера.

Для проведення наукових розрахунків з використанням багатовимірних масивів обрано стандартний пакет NumPy. Розроблена система моделювання та прогнозування наслідків епідемії складається з двох програмних застосунків з графічними інтерфейсами. Перший застосунок має такі дві основні функції:

а) завантаження у базу даних структури зв'язків між користувачами деякої частини існуючої віртуальної соціальної мережі (для одержання реалістичної структури соціальної мережі);

б) підготовка бази даних до моделювання поширення епідемії по завантаженому графу віртуальної соціальної мережі.

Другий застосунок, оперуючи багатьма факторами, моделює епідемію, прогнозує її наслідки та відображає статистичну інформацію про хід моделювання та стан користувачів соціальної мережі. В подальшому ці застосунки можуть покращуватись за рахунок закладеної в них масштабованості, завдяки чому вони зможуть оперувати ще більшою кількістю факторів, які можуть впливати на розвиток епідемії.

Для зберігання даних розробленої системи застосунків використовується SQLite 3. SQLite – це вбудована кросплатформна СУБД, яка підтримує досить повний набір команд SQL і має досить зручний програмний інтерфейс для мови програмування Python [6]. Вона є дуже надійною та простою у використанні. SQLite ідеально підходить для використання в даній системі застосунків, тому що ця СУБД швидка, не вимагає спеціальної установки, а база даних зберігається на диску у вигляді одного файлу.

Щоб переглянути структуру та дані, що записані до бази даних, можна використовувати безкоштовний застосунок DB Browser. Цей застосунок являє собою візуальний інструмент з відкритим сирцевим кодом для створення, розробки і редагування файлів баз даних, сумісних з SQLite.

База даних, що створюється та використовується під час виконання системи моделювання та прогнозування наслідків епідемії, має 5 таблиць:

а) users – основна таблиця, що зберігає всіх опрацьованих учасників соціальної мережі;

б) before\_modeling – учасники соціальної мережі потрапляють до цієї таблиці під час процедури підготовки бази даних до моделювання. Також виконує функцію резервного сховища даних, яке можна повторно використовувати, щоб моделювати декілька епідемій без повторного запуску процедури підготовки бази даних;

в) healthy – до цієї таблиці вносяться здорові учасники соцмережі під час моделювання епідемії;

г) not\_healthy – до цієї таблиці вносяться хворі учасники соцмережі під час моделювання епідемії;

г) dead – до цієї таблиці вносяться мертві учасники соціальної мережі під час моделювання епідемії.

Наповнення бази даних відбувається через запити до серверів віртуальної соціальної мережі через API відповідного веб-ресурсу.

У деяких користувачів віртуальних соціальних мереж число друзів набагато перевищує число Данбара, що являє собою обмеження на кількість постійних соціальних зв'язків, які людина може підтримувати [7]. Підтримка таких зв'язків передбачає знання особливостей конкретного індивіда, зв'язок з яким необхідно підтримувати, його характеру, а також соціального стану, що вимагає наявності певних розумових здібностей і витрати значних інтелектуальних ресурсів. За різними оцінками, число Данбара в людських співтовариствах лежить в діапазоні від 100 до 230, найчастіше умовно число приймається рівним 150. Тому щоб мати в базі даних більш рівномірні дані, розроблений застосунок ігнорує людей з надто великим та надто малим числом соціальних зв'язків. Вікно налаштувань застосунку для підготовки бази даних можна побачити на рис. 1.

Налаштування

Список початкових id, з якого почне наповнюватися БД:  
(розділити пробілом)

132646860 243109925 245135939|

Нижня межа друзів для 1 людини:

10

Верхня межа друзів для 1 людини

500

Відображати лише успішні записи до БД

Кількість ітерацій для перевірки друзів користувачів:

3

Обмеження кількості записів для моделювання:

1000000

Для моделювання відбирати користувачів лише з України

OK Cancel

Рис. 1. Вікно налаштувань для підготовки бази даних розробленого застосунку

Наступним кроком, після наповнення бази даних, є її підготовка до моделювання (приклад зображено на рис. 2). Інформація фільтрується та структурується в потрібних таблицях. Кожний учасник мережі має зв'язки з іншими учасниками, але не всі вони містяться в базі даних, тому відсутні зв'язки видаляються. Такий процес видалення зв'язків займає досить багато часу, в залежності від розмірів бази даних. На виході, перед моделюванням, база даних не має учасників мережі без зв'язків з іншими учасниками.

Продуктивність масової вставки SQLite може варіюватися від 85 вставок в секунду до більш 96000 вставок в секунду. Виявляється, продуктивність SQLite може значно відрізнятись (як для масових вставок, так і для вибірок) в залежності від того, як налаштована база даних і як використовується API. При найгіршому сценарії операції занадто повільні, тому що SQL буде скомпільовано в код VDBE для кожної вставки, і кожна вставка буде відбуватися у своїй власній транзакції. За замовчуванням SQLite буде оцінювати кожен оператор INSERT / UPDATE в рамках унікальної транзакції. Якщо виконується велика кількість вставок, рекомендується вкласти операцію в транзакцію. Використання транзакції є величезним поліпшенням, але повторна компіляція оператора SQL для кожної вставки не має сенсу, якщо використовується один і той же SQL багаторазово. Скомпільовавши оператор SQL один раз, а потім зв'язавши параметри з цим оператором, використовуючи `sqlite3_bind_text`, можна подвоїти продуктивність. Графічний інтерфейс створено через застосунок Qt Designer. Шаблон зберігається в \*.ui. Звичайно, можна використовувати ui-файли безпосередньо з Python-коду, проте є й інші шляхи. Код ui-файлу конвертується в Python-файл, який потім імпортується і використовується як звичайний модуль. В цьому може допомогти інструмент розробника Pyuic5, який полегшує перетворення файлів \*.ui PyQt5 Designer у файли \*.py [8].

Налаштування

Обрати main.db

Нульовий пацієнт обирається випадково

Кількість нульових пацієнтів, що буде обрано випадково:

1

Введіть id користувача, з якого почнеться моделювання:

3973283 9259454 12373354

Тривалість хвороби

Мінімальна кількість ітерацій: 6

Максимальна кількість ітерацій: 16

Кількість рядків в топі (детальна інформація):

10

Ймовірність передати хворобу:

5

Ймовірність летального випадку:

15

Кількість ітерацій моделювання:

Обмежити кількість ітерацій

45

Пауза між кроками моделювання:

0.5

OK Cancel

Рис. 2. Налаштування розробленої імітаційної моделі для експерименту №1

Для відображення статистичної інформації роботи застосунка, що наповнює базу даних, створено клас MyErrorCounter, що рахує час виконання застосунка та кількість записів в БД, кількість деактивованих та закритих профілів, кількість колізій, перевищень кількості друзів, а за запитом повертає всю необхідну інформацію. Також застосунок для моделювання та прогнозування наслідків епідемії зображує на графіку кількість здорових, хворих, одужавших та померлих учасників соціальної мережі на кожному кроці моделювання. Приклади такого графіку можна побачити на рис. 3, 5, 7.

Щоб дослідити як система імітаційного моделювання епідемії працює при різних початкових параметрах, було проведено серію експериментів, результати яких наведено на рис. 2-7.

З запропонованих прикладів виконання застосунку моделювання та прогнозування наслідків епідемії видно, що все працює так, як було задумано. В залежності від різних наборів початкових параметрів, система видає різні результати, що відповідають очікуваним результатам. Також були протестовані всі налаштування даного застосунку та наглядно показана зручність розробленого графічного інтерфейсу.

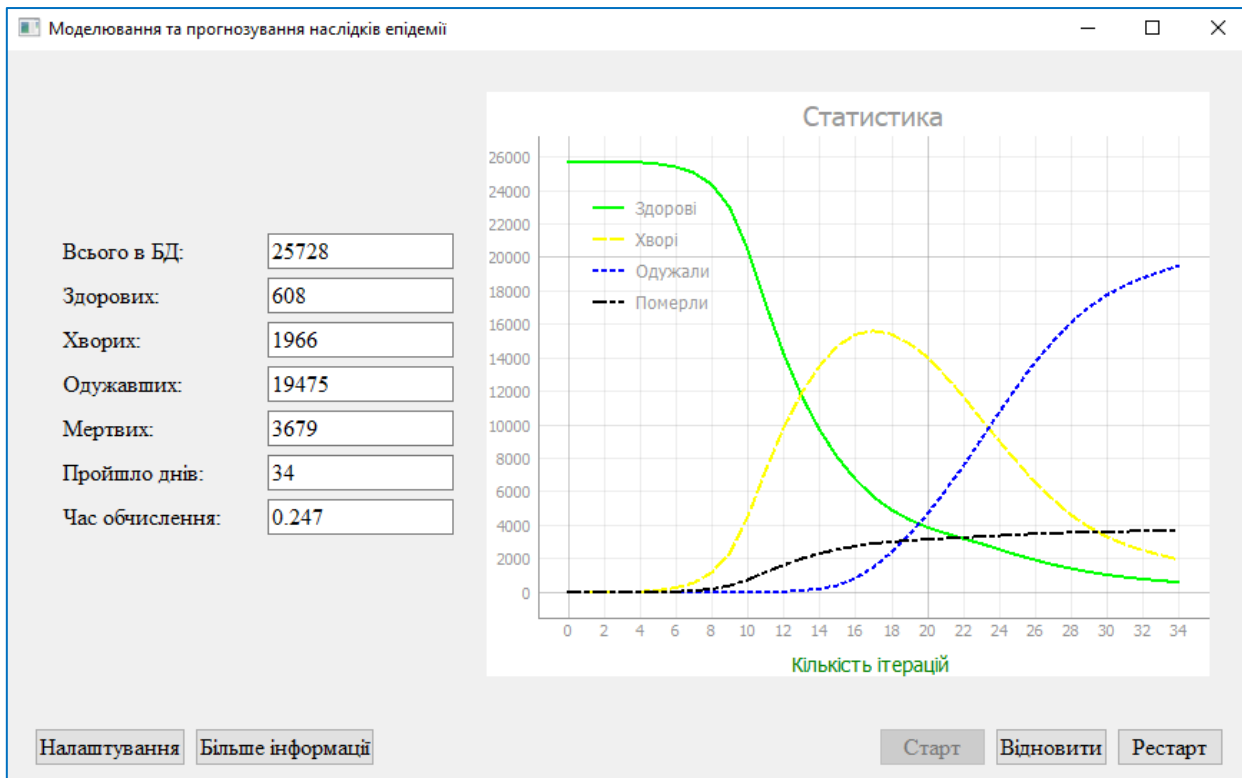


Рис. 3. Результат проведення експерименту №1 у розробленій програмній імітаційній моделі

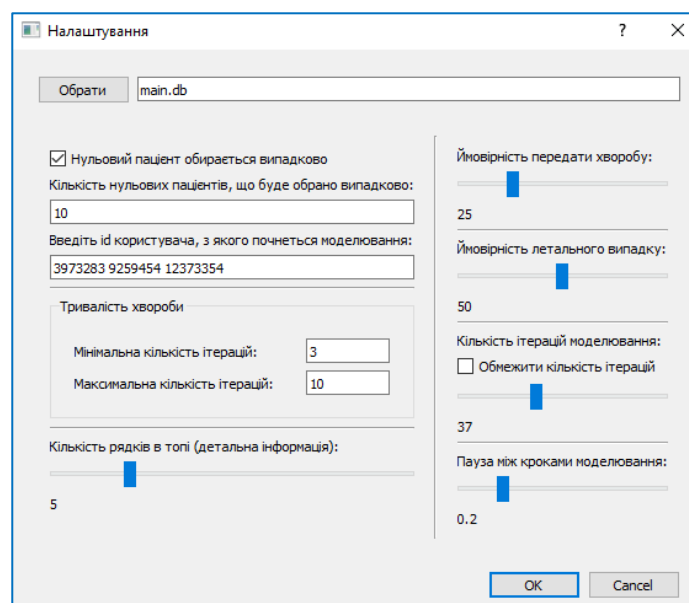


Рис. 4. Налаштування розробленої імітаційної моделі для експерименту №2

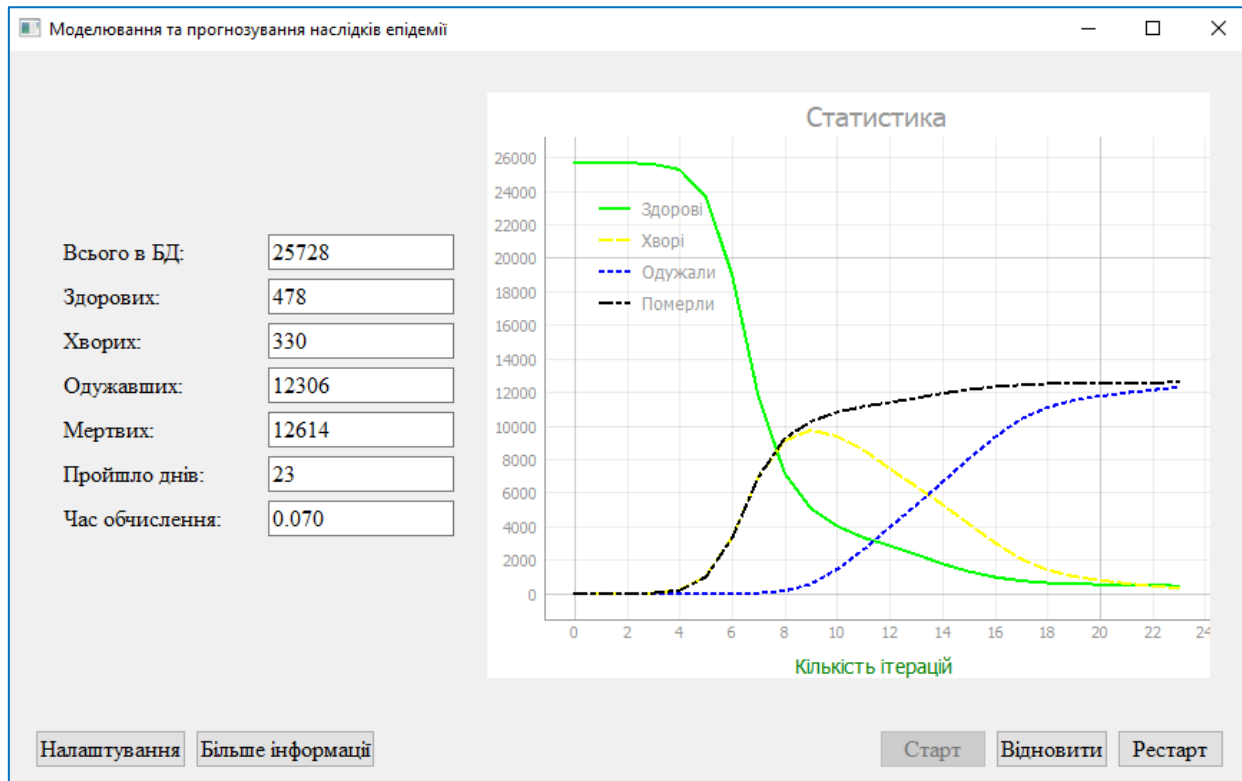


Рис. 5. Результат проведення експерименту №2 у розробленій програмній імітаційній моделі

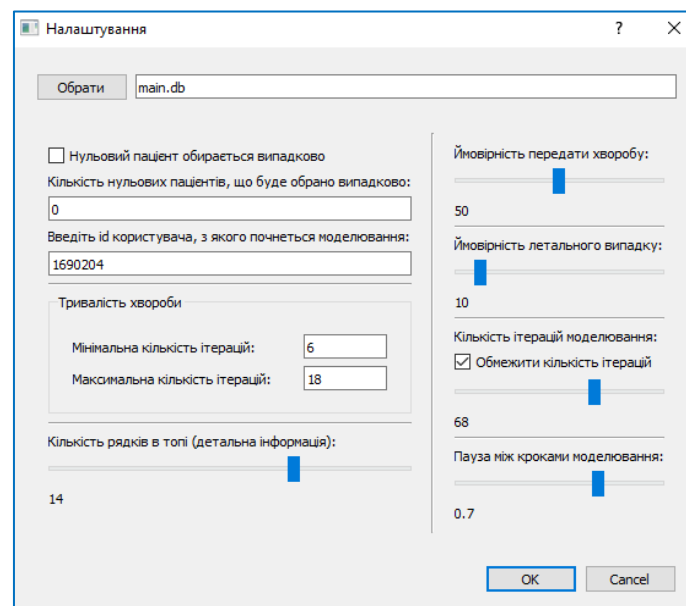


Рис. 6. Налаштування розробленої імітаційної моделі для експерименту №3

## Висновки

Було розроблено програмну імітаційну модель епідемії засобами мови Python та пакету інструментів EpiModel для мови R. Тестувалася модель на прикладі поширення інфекційних захворювань, хоча також може бути використана для моделювання поширення інформаційно-психологічних впливів.

Було досліджено можливості мови програмування Python та пакету інструментів EpiModel для мови R для імітаційного моделювання епідемії. Дослідження показало, що дані мова програмування та пакет інструментів

дають усі необхідні засоби для розробки програмної моделі епідемії. Python дозволяє швидко розробляти програми для аналізу даних, Qt Designer дає можливість розробити зручний графічний інтерфейс користувача для застосунків на мові Python, а пакет інструментів EpiModel дає можливість реалізувати найбільш поширені математичні моделі епідемії, зокрема, SI, SIR та SIS. Структура соціальної мережі у даній моделі не генерувалася, а завантажувалася з частини віртуальної соціальної мережі, що прискорило розробку, а мова програмування Python дозволила за допомогою своїх інструментів та бібліотек створити парсер та взаємодію з



API потрібного веб-ресурсу. Також було проведено серію експериментів з різними параметрами моделі для

перевірки її працездатності та отримано очікувані результати моделювання.

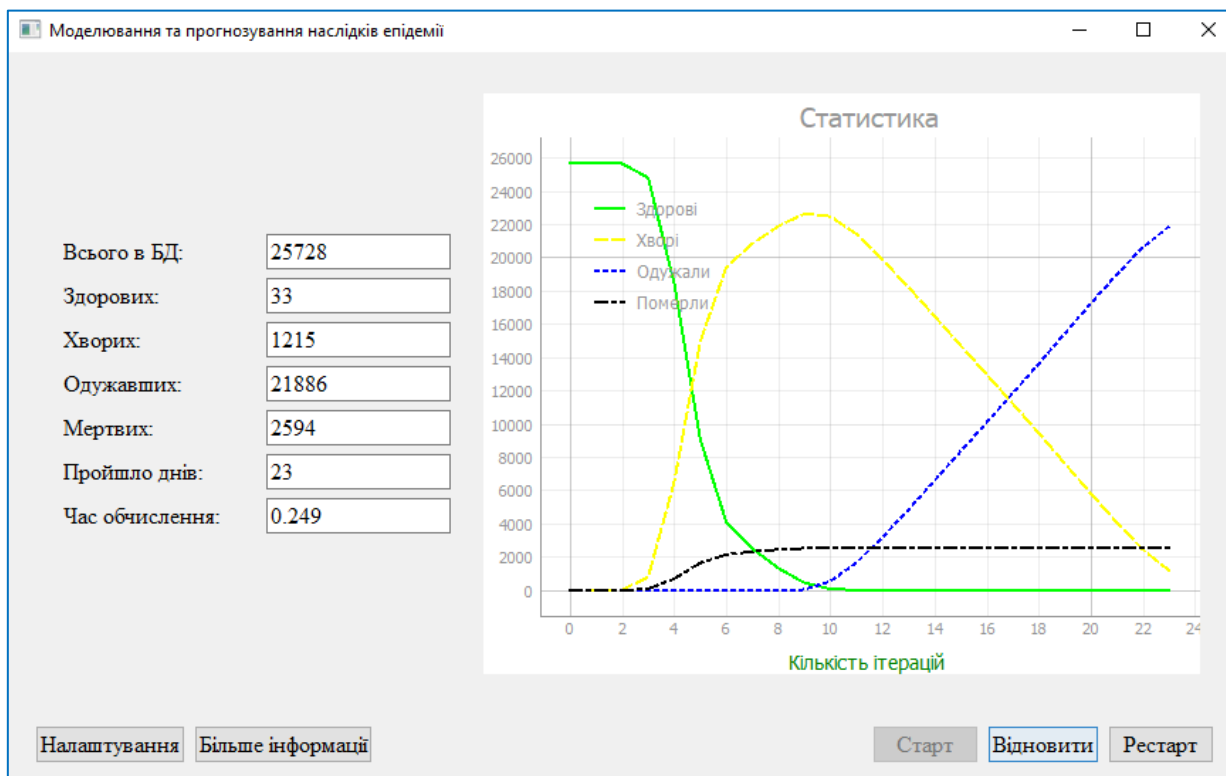


Рис. 7. Результат проведення експерименту №3 у розробленій програмній імітаційній моделі

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Brzezniak Z. "Basic Stochastic Processes: A Course Through Exercises (Springer Undergraduate Mathematics Series)", 2000, с. 236.
2. David P., Raftery A.E., "Inference for Deterministic Simulation Models: The Bayesian Melding Approach", Journal of the American Statistical Association 95, 2000, с. 1244–1255.
3. EpiModel [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.epimodel.org/>
4. Budd T., "An Introduction to Object-Oriented Programming", Addison-Wesley; Subsequent edition, 1996, 452 p.
5. Blanchette J., Summerfield M., "C++ GUI Programming With Qt 4", Prentice Hall Ptr, 2006, 537 p.
6. SQLite [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://sqlite.org/>
7. Число Данбара [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Число\\_Данбара](https://uk.wikipedia.org/wiki/Число_Данбара)
8. Інструмент розробника PyQt5 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://github.com/Abdelatif/Pyuic5-Tool>

Received (Надійшла) 12.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.11.2022

#### Computer simulation model of epidemics using the python language and the epimodel tool package for the r language

M. Mosold, Ye. Meleshko, M. Yakymenko, D. Bashchenko

**Abstract.** The goal of this work was to create software for simulating epidemics and to research the capabilities of the Python language and the EpiModel toolkit for the R language in solving this problem. Modeling the processes of spreading and forecasting the consequences of epidemics, both infectious and informational and psychological, is an important scientific and practical task in our time. There are approaches and tips for modeling epidemics, as well as tools that can simplify the path to achieving the desired goal. Epidemic models are divided into two main types: stochastic model and deterministic model. The most famous mathematical models of epidemics are SI, SIR and SIS. A computer simulation model of epidemics was developed using the Python language and the EpiModel tool package for the R language. The model was tested on the example of the spread of infectious diseases, although it can also be used to model the spread of informational and psychological influences. The possibilities of the Python programming language and the R language EpiModel toolkit for simulating epidemics were investigated. The research showed that the given programming language and toolkit provide all the necessary tools for developing a computer model of epidemics. Python allows you to quickly develop programs for data analysis, Qt Designer allows you to create a convenient graphical user interface for Python applications, and the EpiModel toolkit allows you to implement the most common mathematical models of epidemics, in particular, SI, SIR and SIS. The structure of the social network in this model was not generated, but loaded from a part of the virtual social network, which accelerated the development, and the Python programming language allowed using its tools and libraries to create a parser and interaction with the API of the desired web-resource. A series of experiments with various parameters of the model was also conducted to check its efficiency and expected simulation results were obtained.

**Keywords:** computer model, simulation modeling, epidemics, virus epidemic, information epidemic, Python, EpiModel.

O. Rudenko, O. Bilokin

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

## APPLICATION OF GENERATIVE DIFFUSION MODELS IN DIGITAL IMAGE CREATION

**Abstract.** There's been a significant surge in the popularity of generative networks over the last year. With public releases of such advanced models as DALL-E, Stable Diffusions, or GPT-3, anyone with modest, run-of-the-mill hardware can dabble in machine learning [3]. Diffusion models are inspired by non-equilibrium thermodynamics. Diffusion models are a subcategory of likelihood-based models. They are known to offer reliably scalable, high-fidelity images while retaining a stationary training objective. These models generate samples by gradually removing noise from a signal, and their training objective can be expressed as a reweighted variational lower bound [2]. This class of models already holds the state-of-the-art [6] on CIFAR-10 [3], but still lags behind GANs on difficult generation datasets like LSUN and ImageNet. Nichol and Dhariwal [4] found that these models improve reliably with increased compute, and can produce high-quality samples even on the difficult ImageNet 256×256 dataset using an upsampling stack. However, the FID of this model is still not competitive with BigGAN-deep [5], the current state-of-the-art on this dataset. Even more, these models are capable of producing an infinite amount of unique, high-quality images, human-like speech, and realistic music, indistinguishable from human-made ones at the first glance. The popularity of generative models has grown rapidly. Likelihood-based models might provide better performance in comparison to GANs. Diffusion models are a promising new category of likelihood models. Disco Diffusion is a combination of CLIP and ImageNet models. It can generate digital art based on text prompts. Numerous applications are possible for this model, such as the creation of video, animation and image content. Several distinctions have to be considered when choosing Disco Diffusion over GAN.

**Keywords:** GAN, generative adversarial networks, artificial intelligence, non-equilibrium thermodynamics, diffusion models, digital art, ImageNet model, WordNet.

### Introduction

There's been a significant surge in the popularity of generative networks over the last year.

With public releases of such advanced models as DALL-E, Stable Diffusions, or GPT-3, anyone with

modest, run-of-the-mill hardware can dabble in machine learning [3]. Even more, these models are capable of producing an infinite amount of unique, high-quality images, human-like speech, and realistic music, indistinguishable from human-made ones at the first glance.

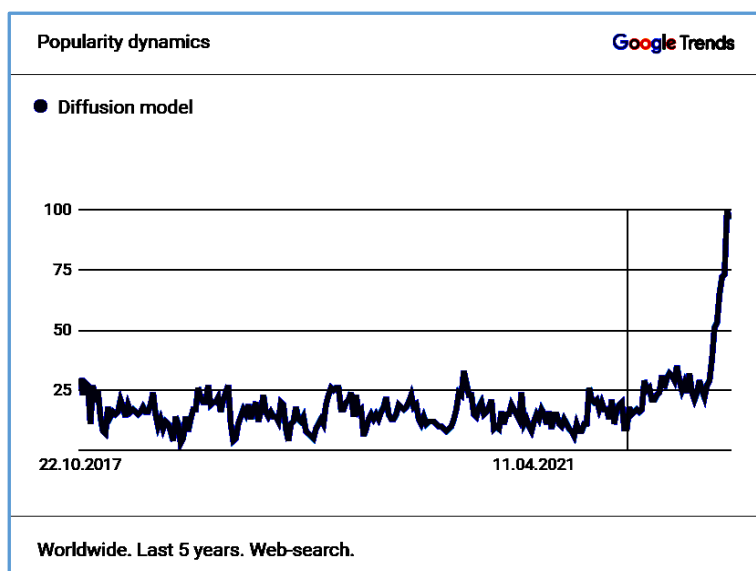


Fig. 1. Search trends over the last 5 years

No doubt, there is still much room for improvement beyond the current state-of-the-art, and better generative models could have wide-ranging impacts on graphic design, games, music production, and countless other applications [1]. These models are created on the shoulders of their predecessors – GAN (Generative adversarial networks) and while those provide highly

impressive results, the drawbacks of using GANs may prove to be too much when applied to other, yet unexplored domains. As an alternative, recent research on the usage of diffusion models was conducted to achieve the levels of quality that GANs possess, while evading the problems such as:

- lack of diversity, where GANs often perform worse than likelihood-based models;
- difficulties in scaling;
- difficulties in training, where GANs may often collapse if the selection of hyperparameters and regularizers proves to be of insufficient sophistication [6].

However, much work has been done to achieve GAN-like sample quality with likelihood-based models and, while these models capture more diversity and are typically easier to scale and train than GANs, they still fall short in terms of visual sample quality. Furthermore, except for VAEs, sampling from these models is slower than GANs in terms of wall-clock time [4, 10].

Diffusion models are inspired by non-equilibrium thermodynamics. Diffusion models are a subcategory of likelihood-based models. They are known to offer reliably scalable, high-fidelity images while retaining a stationary training objective. These models generate samples by gradually removing noise from a signal, and their training objective can be expressed as a reweighted variational lower bound [2]. This class of models already holds the state-of-the-art [6] on CIFAR-10 [3], but still lags behind GANs on difficult generation datasets like LSUN and ImageNet. Nichol and Dhariwal [4] found that these models improve reliably with increased compute, and can produce high-quality samples even on the difficult ImageNet 256×256 dataset using an upsampling stack. However, the FID of this model is still not competitive with BigGAN-deep [5], the current state-of-the-art on this dataset.

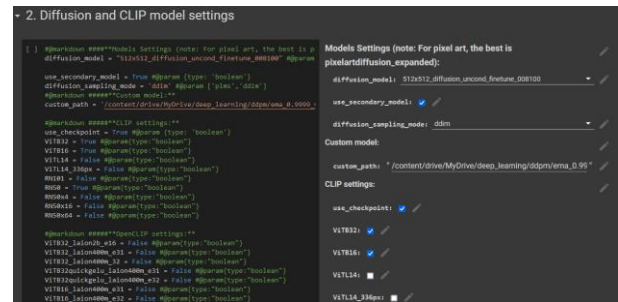
**The main part of the article**

This particular model, Disco Diffusion, is an amalgamation of OpenAI’s ImageNet model combined with CLIP. Such conjunction allows us to connect text-based prompts with pictures, creating a fully-functional text-to-image model that can generate digital art from just a few sentences.

What is CLIP? CLIP is a transformer model created by Open AI to match text prompts with their respective image. The reasoning for the creation of CLIP is simple: If we can create models that accurately describe the text and we can create models that accurately describe images, then we are capable of joining the two to easily map image to text by combining similar descriptions [5].

And what is ImageNet? It is an image dataset organized according to the WordNet hierarchy, a foundation for the advancement of deep learning research and self-supervised (without the usage of human-labeled data) computer vision technologies. Each meaningful concept in WordNet, possibly described by multiple words or word phrases, is called a "synonym set" or "synset". There are more than 100,000 synsets in WordNet; the majority of them are nouns (80,000+). The goal of this service is to provide on average 1000 images to illustrate each synset. Images of each concept are quality-controlled and human-annotated. In its completion, ImageNet offers tens of millions of cleanly labeled and sorted images for most of the concepts in the WordNet hierarchy, creating a monumental basis for the training of image processing models. [7, 8].

Disco Diffusion is an open-source project, as is its larger counterpart – Stable Diffusions project. These models give permission under MIT license to deal in the Software without restriction, including without limitation the rights to use, copy, modify, merge, publish, distribute and sublicense.



**Fig. 2.** Model configuration

The model allows the user to control the output via diffusion model presets, sampling modes, numerous CLIP, and OpenCLIP parameter presets, batch and configurations depending on the required art style and available hardware.

Upon receiving the CLIP configurations, the model then may be modified further with different values for image sizes, diffusion steps, rescaling and resolutions overriding previously selected presets. Then, additional parameters may be specified for the creation of video content, such as the number of steps, guidance scale, number of skipped steps, animation settings, and input files.

At last, the model receives a text prompt from the user. For demonstrational purposes, we will create a unique image based on a text prompt using a modified copy of the model with the following input:

"A gorgeous painting of an isolated lighthouse, shining its light across a tumultuous sea of red in the style of bygregrutkowski and thomaskinkade.", "yellowcolorscheme".

Once the model is started, the generation of the prompted image begins. The model defines a random seed and iteratively creates.

As you can see (Fig. 3), the model starts by generating a raster of monochrome noise, where only vague shapes of the main landscape objects can be discerned.



**Fig. 3.** Initial Image, the first iteration of the target image

As the cycles advance, more and more details are generated by the model to create a distinctive picture.



Fig. 4. Third iteration

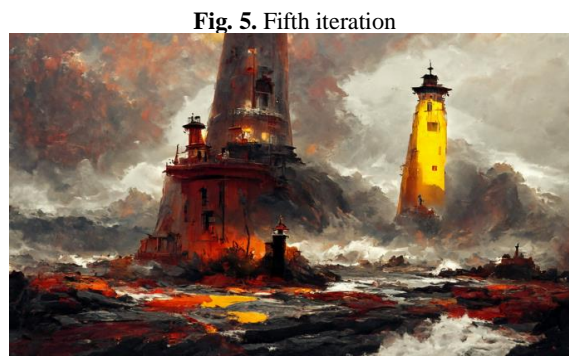
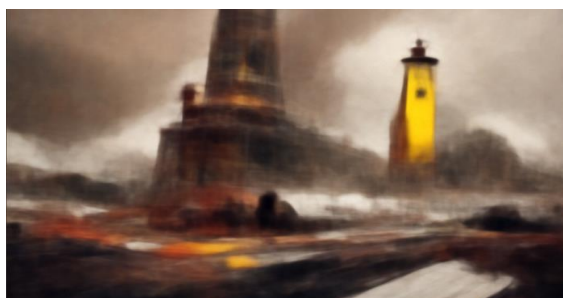


Fig. 6. Final Image

## Conclusions

We have explored the possibilities, advantages, and downsides of using Disco Diffusion – a diffusion model made to generate videos, animations, illustrations, and artworks based on a plain text input.

## REFERENCES

1. Prafulla Dhariwal, Alex Nichol – Diffusion Models Beat GANs on Image Synthesis URL: <https://arxiv.org/pdf/2105.05233.pdf>
2. Sakib Shahriar - GAN Computers Generate Arts? A Survey on Visual Arts, Music, and Literary Text Generation using Generative Adversarial Network, URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2108/2108.03857.pdf>
3. Ali Razavi, Aaron van den Oord, Oriol Vinyals – Generating Diverse High-Fidelity Images with VQ-VAE-2, URL: <https://arxiv.org/pdf/1906.00446>
4. Rewon Child Very Deep VAEs Generalize Autoregressive Models and Can Outperform Them on Images, URL: <https://arxiv.org/pdf/2011.10650>
5. Matthew Cateer – CLIP Prompt Engineering for Generative Art, URL: <https://matthewmcateer.me/blog/clip-prompt-engineering/>
6. Andrew Brock, Theodore Lim, J.M. Ritchie, Nick Weston - Neural Photo Editing with Introspective Adversarial Networks, URL: <https://arxiv.org/pdf/1609.07093>
7. Open AI Image GPT, URL: <https://openai.com/blog/image-gpt/>
8. ImageNet: About, URL: <https://www.image-net.org/about.php>
9. Google Trends, URL: <https://trends.google.com/>
10. Golovko G. V., Nikiforova K. M. Information systems use at Poltava national technical Yuri Kondratyuk University. *Control, navigation and communication systems*. 2018. Vol. 3. P. 103-105.

Received (Надійшла) 05.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 09.11.2022

## Використання генеративних дифузійних моделей машинного навчання у створенні зображень

О. Руденко, О. Білокінь

**Анотація.** За останній рік стався значний сплеск популярності генеративних мереж. Завдяки публічним випускам таких просунутих моделей, як DALL-E, Stable Diffusions або GPT-3, кожен із скромним, звичайним апаратним забезпеченням може спробувати машинне навчання [3]. Моделі дифузії натхненні нерівноважною термодинамікою. Дифузійні моделі є підкатегорією моделей на основі ймовірності. Відомо, що вони пропонують надійно масштабовані високоточні зображення, зберігаючи при цьому нерухомий тренувальний об'єкт. Ці моделі генерують вибірки шляхом поступового видалення шуму із сигналу, а їх мета навчання може бути виражена як переважена варіаційна нижня межа [2]. Цей клас моделей уже відповідає найсучаснішому [6] на CIFAR-10 [3], але все ще відстає від GAN щодо складних наборів даних, таких як LSUN і ImageNet. Нікол і Дхарівал [4] виявили, що ці моделі надійно вдосконалюються зі збільшенням обсягу обчислень і можуть створювати високоякісні зразки навіть на складному наборі даних ImageNet 256 × 256 за допомогою стека підвищення дискретизації. Проте FID цієї моделі все ще неконкурентоспроможний із BigGAN-deer [5], поточним сучасним набором даних. Більше того, ці моделі здатні створювати нескінченну кількість унікальних високоякісних зображень, людської мови та реалістичної музики, яку на перший погляд неможливо відрізнити від рукотворної. Популярність генеративних моделей швидко зростає. Ймовірнісні моделі можуть забезпечити кращу продуктивність у порівнянні з GAN. Дифузійні моделі є новою перспективною категорією ймовірнісних моделей. DiscoDiffusion – це комбінація моделей CLIP та ImageNet. Вона може генерувати цифрові картини на основі текстових підказок. Для цієї моделі можливі численні застосування, такі як створення відео, анімації та графічного контенту. При виборі DiscoDiffusion замість GAN слід враховувати певні відмінності.

**Ключові слова:** GAN, generative adversarial networks, штучний інтелект, дифузійні моделі, цифрове мистецтво, ImageNetmodel, WordNet.

Alevtyna Filonenko, Heorhii Molchanov, Oleksandra Bellorin-Herrera

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

## THE METHOD OF CALCULATING THE CAPACITY OF THE CLOUD COMPONENT OF THE DISTRIBUTED MULTISERVICE NETWORK

**Abstract.** A method for calculating the bandwidth of the cloud component of a distributed multiservice network is proposed. Which takes into account the probabilistic characteristics of the link of the first and second orders. At the preliminary stages, the probability of packet loss within the network link is calculated. An analysis of the queues of switching nodes of communication with the cloud is also carried out. Consistent application of the method will allow to estimate the probability of losses for different network users. It will also make it possible to determine the rational loading of network links with the aim of optimal distribution of network resources. The obtained results can be applied directly in the design of a distributed multiservice network. In it, user access to the link resource can be either unlimited or limited with the introduction of link resource reservation for priority classes of users. And also for the design of a distributed multiservice network in which users are provided with fixed bit rates of information transmission. The direction of further research is the extension of the method for a distributed multiservice network, in which some of the links are dependent. It is planned to develop an algorithm in which calculations for the cloud component of the network can be performed in parallel.

**Keywords:** the distributed multiservice network, cloud component, cloud communication switching node, statistical multiplexer, bandwidth, probabilistic characteristics, network link, network resources.

### Introduction

**Statement of the problem and analysis of the literature.** The problems of integrating various types of communication, including information, system and network aspects, have been the most relevant in the field of telecommunications for a number of years [1]. Today, there is an expansion of user needs in new types of communication with high speeds of information transfer. This requires significantly higher throughput values. Such requirements have led to the fact that at present many network operators have begun the transition to distributed multiservice networks that implement the second level of integration and users of distributed types of communication: audio, video, data transmission, multimedia, etc. To date, intensive research is being carried out in the field of the theory of construction and operation of a distributed multiservice network [2, 3]. Among the complex of problems solved in this area, one of the main ones is the problem of optimal, from the point of view of distribution of network resources, building a switching node.

The integration of various types of communication in an extensive multiservice network in the system aspect is based on ATM technology as a secure method of information transmission regardless of its source and uses the principle of asynchronous time multiplexing [4, 5]. All kinds of information are displayed in standard forms of fixed length packets (ATM cells). These packets in an asynchronous mode, by the method of statistical multiplexing, bequeath the transmission medium. In a divided multiservice network, packet switching is networked over virtual circuits. Information packets arriving via statistically compacted input lines for take-offs with a cloudy component should be redistributed on similar output lines. This operation is carried out in the mode of fast switching of packets using various means of switching: multilink switching systems, a common bus or memory, switching tori, etc. However, the fundamental problem in creating a distributed multiservice network is the problem of ensuring the rational use of its resources

and the required quality of user service [6-11]. The solution of this problem requires, first of all, the development of a method for calculating the throughput of a distributed multiservice network and assessing the quality of user service. Given the structural complexity of a distributed multiservice network, it is advisable to first solve this problem with respect to the cloud component of a distributed multiservice network. With this method at hand, the throughput of the entire network can be calculated.

**The purpose of the article** is to develop a method for calculating the throughput of an individual link in a distributed multiservice network. Such a network takes into account the probabilistic characteristics of the link of the first and second orders, multiservice factors and traffic structure, as well as the effect of link resource reservation as the most promising method for managing the distribution of resources of a distributed multiservice network.

### 1. Loss probability calculation packets within a distributed multiservice network link

Depending on the selected means of switching of a distributed multi-service network, when using fast switching of packets (there are situations when a packet cannot be immediately transmitted to the outgoing line due to the current transmission of another packet on this line and must wait for the appropriate moment of transmission in the ferry, which is designed to store  $L$  packets. If the buffer overflows, then packet loss is possible, i.e. packets are serviced at the fast packet switching node by a lossy and waiting mass service system.

Consider the problem of estimating the probability of packet loss in a multistage fast packet switching system by defining its basic switching element as an element of  $n$  inputs with capacity buffers  $L_i$  and  $m$  outputs, which are inputs to the switching system of fast packet switching. The structure of the fast packet switching system can be different (Fig. 1), while if the system has  $S$  cascades, the virtual transmission channel

will contain S buffers with  $L_{\Sigma}^{(S)} = \sum_{i=1}^n L_i$  waiting places.

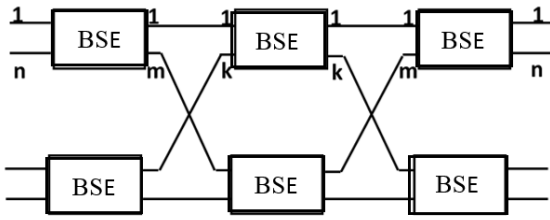


Fig. 1. Three-stage fast packet switching system

Packet losses in this model occur when any buffer overflows. Since packet losses are possible when the buffer is connected through the CS to one of the lines flowing from the basic switching element, the estimation of the probability of losses in the basic switching element can be reduced to the calculation of the probability of losses in a single-line mass service system with a buffer of finite capacity. Since all packets have the same length and the law of the arrival of packets in the mass service system is arbitrary, using Kendall's notation [5], the basic switching element of a link of a distributed multiservice network can be considered a mass service system of the form GI/D/1/ $L_{\Sigma}^{(S)}$ .

Let the incoming load be given by the load intensity  $\lambda$  and the dispersion coefficient  $k_D$  ( $k_D = \sigma^2 / \lambda, \sigma^2$  – dispersion). Approximate this system with a single-channel system M/D/1/ $L_A$  with Poisson load and  $L_A$  waiting places, the probability of losses in which is defined as [2]:

$$P_A = 1 - (\lambda + P_0)^{-1}, \tag{1}$$

where the stationary probability of the absence of processed packets  $P_0$  in the link is determined using the system of Kolmogorov equations [1]:

$$P_j = (k_0)^{-1} \left( P_j - k_j P_0 - \sum_{i=1}^j (k_{j+i-1} P_i) \right); \tag{2}$$

$$k_j = (j!)^{-1} \lambda^j e^{-\lambda}.$$

Consider a Poisson unilinear system M/D/1/ $L_A$ . Let's select such a number of waiting places in it  $L_A$ , at which the system at the load intensity  $\lambda$  will have the same probability of loss as the system M/D/1/ $L_{\Sigma}^{(S)}$ . At the same time, the probability of losses in this system is equal [2]:

$$P_M = \lambda^{L_A} \left( P_{\lambda,1}^{-1} + \lambda (1 - \lambda^{L_A}) (1 - \lambda)^{-1} \right), \tag{3}$$

where  $P_{\lambda,1}$  – the probability of loss, which is determined by the first Erlang formula at the capacity of the bundle of channels  $V = 1$  and loads  $\lambda$ .

Accepted  $P_M = P_A$  and using expressions (1) and (3), possible from the system M/M/1/ $L_A$  go to system M/D/1/ $L_A$ , which at the same intensity will have the same losses.

System M/M/1/ $L_A$  can be used to approximate the probability of losses in the system GI/M/1/ $L_A$  by using  $k_D$  - Witt's approximations [8], according to some imaginary behavior of the N-linear system GI/M/N/ $L_A$  at large loads can be roughly described by the Poisson system, which receives the load  $\lambda_{eq} = \lambda / \omega^2$ , serviced  $V_{eq} = V / \omega^2$  devices and has  $L_{eq} = L_{\Sigma}^{(S)} / \omega^2$  waiting places, where:

$$\omega = \frac{k_D - 1 + C}{C}; \quad C = \frac{\lambda k_D - U}{\lambda k_D + U}, \tag{4}$$

and the values of the parameter U, which can be determined by the linear regression method, are in the range from 0,2 to 0,9 Erl. After transformations of expressions (1)–(4) we get

$$P_A = (\lambda_{eq})^{L_A / \omega} \times \left( P_{(\lambda_{eq}, V_{eq})}^{-1} + (\lambda_{eq})^{L_A / \omega + 1} (1 - \lambda_{eq})^{-1} \right), \tag{5}$$

where the probability of losses on the beam  $V_{eq} = V / \omega^2$   $P_{(\lambda_{eq}, V_{eq})} = P(\lambda_{eq}, V_{eq})$  calculate using the integral representation of Erlang's formula [8]:

$$P(\Lambda, V) = \Lambda^V \left( e^{\Lambda} \Gamma(V + 1, \Lambda) \right)^{-1}, \tag{6}$$

$\Gamma[V + 1, \Lambda]$  – incomplete gamma function equal to the value of the definite integral

$$\Gamma(V + 1, \Lambda) = \int_{\Lambda}^{\infty} e^{-t} t^{\Lambda} dt,$$

after representing which as a continued fraction and substituting the result into expression (6), we obtain the following recurrence relation for calculating the value of the beam loss probability:

$$P_i(\lambda_{eq}, V_{eq}) = \frac{\lambda_{eq} - V_{eq} / (1 + \theta_i)}{\lambda_{eq}},$$

where  $\theta_n = 0$ ;  $\theta_{i-1} = i \left( \lambda_{eq} + (i - V_{eq}) (1 + \theta_i)^{-1} \right)^{-1}$ .

The probability of losses defined in (3) can be used to approximate the probability of losses in the system GI/D/1/ $L_{\Sigma}^{(S)}$ , with load  $(\lambda, k_D)$ , that comes.

Analysis of expressions (3) – (6) allows us to conclude that the probability of packet loss for a fast packet switching system significantly depends on the incoming load dispersion coefficient, especially with small losses. Even a relatively small increase in the dispersion coefficient  $k_D$  leads to a sharp increase in

packet loss in the system (Fig. 2), and failure to take into account the second load moment when designing fast packet switching nodes can lead to a sharp deterioration in the quality of service in conditions where the incoming load is even slightly different from Poisson.

**2. Analysis of queues of switching nodes of communication with the cloud of a link of a distributed multi-service network**

A cloud communication node is a managed buffer that receives packets from packet generators. The application of statistical multiplexing is possible only when switching to an asynchronous method of information transmission, which allows you to take into account the statistical features of digital streams created by individual classes of users, and to carry out statistical compression of the transmission path. Organization of user access to a common communication channel through a multiplexer leads to the need to solve the following problems:

- building a classification of users according to the structure of the load created by them;
- evaluation of the transmission speed provided to a given group of users of different classes, necessary to guarantee the standardized quality of service, which is expressed in terms of the probability of packet loss and their delay;
- creation of a user load management procedure, which includes the following two parts:
  - o individual management – monitoring the load of an individual user and checking its compliance with the declared class, as well as smoothing this load so that changing its parameters does not have an excessive impact on packet losses of other users;
  - o integrated management - connection management, i.e. the procedure for making a decision on whether another connection can be established and whether it will not lead to an increase in packet losses and/or delays beyond the norm.

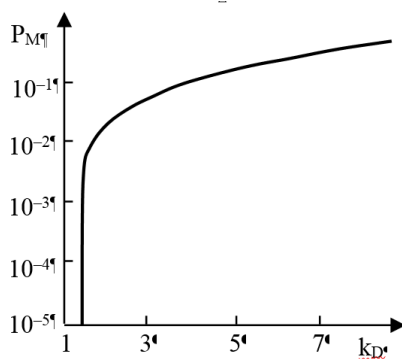


Fig. 2. The impact dispersion coefficient analysis of on the packet loss probability

If  $T$  – average active period of the source,  $\Lambda_p$  – intensity of packet generation in the active station  $S$  – average length of pause between periods of activity,  $D$  – the duration of deterministic service in a fictitious mass service system, then the burst rate (the ratio of the maximum intensity of the arrival of packets to the average) is calculated as

$$B = (T + \Lambda_p) / \Lambda_p.$$

With sufficient storage capacity, the average intensity of the flow of packets that have already been served by the mass service system can be taken as equal to the intensity of their arrival, i.e. equal to

$$\lambda(T + \Lambda_p) / \Lambda_p.$$

On the other hand, during busy periods, packets leave the system with an intensity of  $1/D$ . By marking the relevant packet flow characteristics as  $T_{L_{\Sigma}B}, \Lambda_{L_{\Sigma}B}, S_{L_{\Sigma}B}, B_{L_{\Sigma}B}$  and additionally accepting the condition that during periods of activity the source generates packets after a deterministic time, we obtain:

$$T_{L_{\Sigma}B} = T\lambda D; \Lambda_{L_{\Sigma}B} = 1/D; \\ S_{L_{\Sigma}B} = S + T(1 - \lambda D), B_{L_{\Sigma}B} = B / \lambda D,$$

and the average waiting time is

$$W_{L_{\Sigma}B} = T(\lambda T - 1)2.$$

From this it can be seen that the pulsating flow is smoothed out if the service rate is less than the packet generation rate in the user's active state.

If  $\Pi(z) = a_0 + a_1z + \dots + a_nz^n$  ( $n$  – the maximum number of established connections) – the generating function (GF) of the number of packets arriving per clock (the time of sending one packet to the channel) is chosen so that at least the first moments of the total number of packets generated by all sources during the time period characteristic of the period are equal – dual changes in traffic intensity.

For the average time interval between the beginnings of two periods of activity, and if the storage for cells has unlimited capacity, then a fairly accurate estimate from above of the average waiting time  $W$  is equal to

$$W = \max_{z \in [0,1]} (\Pi(z) / (2\rho(1-\rho))); \quad \rho = \Pi'(1);$$

GF distribution of packet waiting time is calculated as

$$W(z) = (1-\rho) \frac{\Pi(z)-1}{\rho(z-\Pi(z))},$$

and GF distribution of the queue length in the multiplexer has the following form:

$$Q(z) = (1-\rho) \frac{\Pi(z)z(-1)}{z-\Pi(z)}.$$

Substitute the  $\Pi(z)$  in the expression (4), it is possible to obtain a recursive procedure for calculating the queue length distribution ( $q_i = P\{\zeta = i\}$ ,  $\zeta$  – a random value characterizing the length of the queue  $k \geq 1$ ):

$$Q_0(z) = Q_0(z); q_0 = Q_0(0); \\ Q_k(z) = (Q_{k-1}(z) - q_{k-1}) / z; q_k = Q_k(0),$$

type of distribution of the number of packets in the queue with limited storage capacity  $L$

$$q_k^{(L)} = q_k \left( \sum_{i=0}^L q_i \right)^{-1}, \quad q \in \overline{0, L}$$

and the probability of packet loss is equal to

$$P_{CM} = 1 - \left( 1 - q_0^{(L)} \right) / \rho,$$

and on the value  $P_{CM}$  are strongly influenced by the correlation properties of the incoming flow, and the best way to estimate the effect of the correlation of the flow on the probability value is to choose when defining  $\Pi(z)$  this duration interval as characteristic.

### 3. Bandwidth estimation links of a distributed multiservice network

Studies have shown that the bandwidth of a distributed multiservice network depends on many factors, the main of which are:

- number of user classes (number of load sources);
- the size of the bandwidth of the transmission bit rate, necessary to serve the requests of different classes of users;
- the nature of the change in the transmission bit rate band over time (load sources with CBR (constant bite rate) or VBR (variable bite rate));
- an adopted application access control procedure (in ATMs, this is Call Admission Control).

Only taking into account the entire set of factors allows you to estimate the network throughput, in particular, the probability of packet loss for certain classes of users, that is, to build a vector of packet losses. Due to the structural complexity of a distributed multi-service network, it is expedient to solve the problem of calculating the probability of losses first on one link. Analyzing a link of a distributed multiservice network, it is assumed that each class of users creates an incoming load, having  $M_i$  – the number of transmission bit rate bands required to serve users of the class  $K_i$ . The method of calculating the bandwidth of a link of a distributed multiservice network consists of two stages. At the first stage, all traffic sources are replaced VBR on sources of equivalent traffic CBR. Equivalence is understood relative to the preservation of value  $P_A$  – the probability of package losses. The replacement of sources is reduced to the recalculation of the bandwidth of the transmission bit rate. Equivalent transmission bit rate bandwidth for the  $i$ -th class of users with VBR traffic at a given probability  $P_A$  [6] defined as

$$\begin{aligned} k(P_A) &= \chi(P_A)M[\zeta] + \eta(P_A)D[\zeta] / C_L \approx \\ &\approx \chi(P_A)M[\zeta] + \eta(P_A)M[\zeta](h - M[\zeta]) / C_L, \end{aligned}$$

where  $C_L$  – transmission speed on the link;  $h$  – the maximum bit rate bandwidth value of the  $i$ -th user class for the normalized bit intensity of the load generated by this user class;  $M[\zeta], D[\zeta]$  – respectively, the mathematical expectation and dispersion of a random variable characterizing the moments of the probability distribution of the bit rate bandwidth over time;  $\chi(P_A), \eta(P_A)$  – coefficients depending on the

probability of packet loss. The values are determined for different classes of users experimentally, while the mathematical expectation is determined not directly, but through burstiness  $B$ , which is the most important characteristic of the transmitted information, which significantly affects the bandwidth of the link and the entire network, case  $B = 1$  corresponds to a constant rate of information transfer). In a link of a distributed multiservice network, the information transfer rate is a random process  $r(t)$ . Due to physical reasons, there is always a limit to the maximum allowable transfer rate:

$$r_{\max} = \max_{t \in [0, T]} r(t),$$

where  $T$  – given time interval in which the average speed of information transfer is equal to

$$r_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T r(t) dt = r_{\max} / B$$

The second stage of the method includes the calculation of the probabilistic characteristics of the link, taking into account the equivalent replacement of the transmission bit rate bandwidth performed at the first stage. According to the statement of the problem, the method is developed for two strategies of link resource management - in the absence of bandwidth reservation of the transmission bit rate and in its presence.

Let's consider strategy 1, when the access of users to the link resource is not limited and there is no bandwidth reservation of the transmission bit rate. The probability distribution of the number of simultaneously occupied transmission bit rate bands on the link has the form [7]

$$f(x | x \in [0, V]; x \in \mathbb{Z}) = \frac{\frac{1}{x!} \prod_{j=1}^x \mu(j-1) \sum_{j=1}^U A_j}{\sum_{k=0}^V \frac{1}{k!} \prod_{j=1}^k \mu(j-1) \sum_{j=1}^U A_j}. \quad (8)$$

If all link users have unlimited access to the link resource, then the link is a fully accessible bundle and, therefore,  $\mu(j) = 1 \quad \forall j \in [0, V]; j \in \mathbb{Z}$ , that is, the probability of packet loss on the link for users of the  $i$ -th class can be calculated as

$$P_i = \sum_{x=V-M_i+1}^V f(x), \quad i \in \overline{1, U}. \quad (9)$$

The second strategy involves the introduction of reservation of link resources for some classes of users. The probability distribution of the number of simultaneously occupied bit rate bands on a link of a distributed multiservice network has the following form ( $x \in \mathbb{Z}, x \in [0, V]$ ) [9]:

$$f_1(x) = \frac{\frac{1}{x!} \prod_{j=1}^x \mu(j-1) \sum_{j=1}^U A_j (T_i - x)}{\sum_{k=0}^V \frac{1}{k!} \prod_{j=1}^k \mu(j-1) \sum_{j=1}^U A_j \tau(C) (T_i - k)}, \quad (10)$$



where coefficient  $\tau(C)$  takes on non-zero values ( $\tau(C)=1$ ) with positive values  $C$ . Similarly, (9) the probability of packet loss on links for users of the  $i$ -th class is calculated on the basis of distribution (10):

$$\sum_{x=V-M_i+1}^V f_1(x), \quad i \in \overline{1, U}. \quad (11)$$

The proposed method allows constructing an algorithm for calculating the bandwidth of a distributed multiservice network link, taking into account the probabilistic characteristics of the first and second orders. Consistently applying this algorithm for implementing the calculation of throughput for individual network links, it is possible to estimate the probability of losses for different classes of network users from “point to point”, as well as determine the throughput and allowable load of the links of a distributed multiservice network, that is, rationally distribute network resources.

### Conclusions

The article considers a two-stage method of calculating the bandwidth of a separate link of a distributed multiservice network. At the previous stages,

the probability of packet loss within the network link and the analysis of the queues of switching nodes communicating with the cloud are calculated. At the first stage, VBR traffic sources are replaced by similar CBR traffic sources, and the probabilistic characteristics of the link of the first and second orders are taken into account, the second stage is the final one. Consistent application of the method will make it possible to estimate the probability of losses for different network users, to determine the rational loading of network links with the aim of optimal distribution of network resources.

The obtained results can be applied directly in the design of a distributed multi-service network, in which the access of users to the link resource can be either unlimited or limited with the introduction of reservation of link resources for priority classes of users, as well as for the design of a distributed multi-service network, in which users are provided with fixed bit rates of information transmission. The direction of further research is the extension of the method for a distributed multi-service network, in which part of the links are dependent, and the development of an algorithm in which calculations for the cloud component of the network can be performed in parallel.

### REFERENCES

1. Sviridov, A., Kovalenko, A. and Kuchuk, H. (2018), “The pass-through capacity redevelopment method of net critical section based on improvement ON/OFF models of traffic”, *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 2, pp. 139–144, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
2. D. Reese Cloud computing [Text] / George Reese. - SPb.: 2011. - 288 p.
3. Google Cloud Platform [Electronic resource]. – access mode: <http://cloud.google.com>. – 12.04.2013.
4. Ruban, I., Kuchuk, H. and Kovalenko A. (2017), “Redistribution of base stations load in mobile communication networks”, *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No 1 (1), pp. 75–81.
5. A. N. Singh, P. Shiva. Challenges and opportunities of resource allocation in cloud computing: A survey, 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), 2015
6. N. Latha, S.T. Deepa, Cost Optimization in Cloud Services, *International Journal of Computer Appl.* Vol. 106, No.5, 2014
7. M. Malawska, K. Figielab, J. Nabrzyska, Cost Minimization for Computational Applications on Hybrid Cloud Infrastructures, *Journal on Future Generation Computer Systems*, Vol. 29 Issue 7, 2013
8. Q. Jia, Z. Shen, W. Song, etc. Supercloud: Opportunities and Challenges, *ACM SIGOPS Operating Systems Review - Special Issue on Repeatability and Sharing of Experimental Artifacts*, Vol. 49 Issue 1, 2015
9. G. Menaga, S. Subasree. Development of Optimized Resource Provisioning On-Demand Security Architecture for Secured Storage Services in Cloud Computing. *IJESIT*, Vol. 2, Issue 3, 2013
10. Donets, V., Kuchuk, N. and Shmatkov, S. (2018), “Development of software of e-learning information system synthesis modeling process”, *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No 2, pp. 117–121, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.20>.
11. A. Simak Transaction processing / A. Simak // *DBMS*. - 1997. - № 2. - p. 70 - 82.

Received (Надійшла) 12.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.11.2022

### Метод розрахунку пропускної здатності хмарної компоненти розподіленої мультисервісної мережі

А. М. Філоненко, Г. І. Молчанов, О. М. Бельорін-Еррера

**Анотація.** Пропонується метод розрахунку пропускної здатності хмарної компоненти розподіленої мультисервісної мережі, враховуючий ймовірнісні характеристики ланок хмари першого та другого порядків. На попередніх етапах проводиться розрахунок ймовірності втрати пакетів у межах окремої ланки хмари та аналіз черг на комутаційних вузлах зв'язку із хмарою. Послідовне застосування методу дозволяє провести оцінку ймовірності втрат для різних класів користувачів мережі, визначити раціональне завантаження ланок хмари з метою оптимального розподілу хмарних ресурсів. Отримані результати можна застосувати безпосередньо при проектуванні хмарної компоненти мультисервісної розподіленої мережі, у якій доступ користувачів до хмарного ресурсу може бути або необмеженим, або обмеженим із введенням резервування ресурсів для пріоритетних класів користувачів, а також для проектування хмарної компоненти мультисервісної розподіленої мережі, у якій користувачам для обміну із хмарою надаються фіксовані бітові швидкості передачі інформації. Напрямок подальших досліджень – розширення методу для мереж, у яких частина ланок хмарних компонент є залежними, та розробка алгоритму, у якому розрахунки для окремих ланок хмари можуть виконуватися паралельно.

**Ключові слова:** розподілена мультисервісна мережа, хмарний компонент, комутаційний вузол зв'язку із хмарою, пропускна здатність, ймовірнісні характеристики, ланка мережі, мережеві ресурси.

O. Shefer, E. Nikitchenko

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

## CYBER PROTECTION OF ENERGOIL ENTERPRISES

**Abstract.** This article is about providing comprehensive protection of the oil refining and distribution company ENERGOIL. This protection includes components such as encryption, anti-virus software, and user access matrices. Within the access delimitation system, a dispatcher must be used, which performs access delimitation. This dispatcher is an employee of the security department. Access is restricted in accordance with the authority of employees. A request for employee access to a specific computer is sent to the database management and event registration unit. The authority of the employee and the characteristics of the object are analyzed by an employee of the security department. The first basic step for organizing work computers at the enterprise will be the creation of user accounts. For this, we create our own account for each computer. A user access matrix was developed for the ENERGOIL enterprise, divided by information departments. It is necessary in order to clearly understand which users have access to which. The Triple DES algorithm was used for encryption. The essence of the algorithm is to use the Data Encryption Standard, or simply DES, published by the US National Bureau of Standards (NBS). First, the data is encrypted with the first key, decrypted back with the second key, and re-encrypted with the third key. Since as many as three keys are used, their total length is actually  $3 * 56 = 168$  bits. The encryption speed is also lower than that of the DES algorithm, but the reliability leaves no doubt. It takes a billion times more attempts to break this encryption than simple DES. Avast and Microsoft Windows Defender antiviruses were used to protect against malicious software, and an access matrix with user accounts and their permissions was created to limit access on work computers.

**Keywords:** cyber security, encryption, algorithm, Triple DES, access.

### Introduction

Information protection is one of the eternal problems. Throughout human history, the ways to solve this problem were determined by the level of technological development. In today's information society, technology plays the role of an activator of this problem – computer crimes have become a characteristic feature of today.

Crimes related to interference with the work of a computer and crimes in which computers are used as necessary technical means are called computer crimes.

Among the causes of computer crimes and related theft of information, the following are the main ones:

- rapid transition from the traditional paper technology of information storage and transmission to the electronic one, at the same time lagging behind technologies for protecting information recorded on machine media;

- widespread use of local computer networks, creation of global networks and expansion of access to information resources;

- constant complication of software tools, which causes a decrease in their reliability and an increase in the number of vulnerabilities. [2]

Today, no one can give an exact figure for the total losses from computer crimes, but experts agree that the relevant amounts are measured in the billions of dollars.

Among the main articles, the following should be highlighted:

- losses caused by the situation when employees of the organization cannot perform their duties due to system (network) failure;

According to the Law of Ukraine "On the Protection of Information in Automated Systems", information protection is a set of organizational and technical measures and legal norms to prevent harm to the interests of the owner of the information or OS and persons who use the information. Related terms

- monetary value of stolen and compromised data;
- costs of restoring the system, checking its integrity, fixing vulnerable areas, etc.

The importance of the problem of data protection in enterprises cannot even be doubted due to the fact that with the knowledge of technologies and opportunities to rob the company – someone will definitely take advantage of it – either internally or externally.

It is also worth considering the moral and psychological consequences for users, staff and owners of IC and information. As for the violation of the security of so-called "critical" applications in state and military administration, atomic energy, medicine, the rocket and space industry, and in the financial sphere, it can lead to serious consequences for the environment, the economy and the security of the state, health and even for people's lives.

Economic and legal issues, private and commercial secrecy, national security – all of this dictates the need to protect information and IS.

Ensuring the security of information technologies is a complex problem that includes legal regulation of IT use, improvement of technologies for their development, development of the certification system, and provision of appropriate organizational and technical conditions for operation. Solving this problem requires significant costs, so the first priority is to correlate the level of necessary security and the costs of its support. To do this, it is necessary to determine potential threats, the probability of their occurrence and possible consequences, choose adequate means and build a reliable corporate threat protection system [2]. "information security" and "information technology security" are also used in the literature [2].

### Application of cryptography

Nowadays, cryptography is used everywhere and is considered the most advanced means of protecting

information. What causes it? Ciphers work at the lowest level of protocols - the bit level. New ways and methods of protecting information from changes and unauthorized interference during transmission, processing and storage are being developed every day, and ciphers are the most common means of keeping information safe.

Modern cryptography is based on mathematical methods of information protection. Its task is to use mathematical transformations or algorithms to reconstruct the text of the message (plaintext) into a disordered and meaningless (ideally, completely random) sequence of symbols, or ciphertext, which can be transmitted over an open channel. To reproduce the plaintext, the recipient performs decryption - the reverse transformation of the received ciphertext.

The encryption algorithm is generally considered open, that is, known to everyone. Secrecy of the procedure is ensured by the use of cryptographic keys - a set of symbols that act as parameters of mathematical transformations. The key is used for both encryption and decryption of the message. Depending on the type of encryption algorithm, the sender's and receiver's keys can be interdependent, correlated (with symmetric encryption) and different (with asymmetric, i.e., open encryption).

A set of encryption and decryption algorithms and all possible plaintexts, ciphertexts and keys is called a cryptosystem. Cryptography is closely related to cryptanalysis - the art of deciphering, or "breaking", ciphertext. This requires a reliable security system, which is unique for each company, otherwise it would be easy to hack them.

Violation of the procedure for cryptographic protection of information by business entities, institutions, organizations, positions. persons, citizens shall be punished in accordance with the legislation of Ukraine [5].

### The main part of the article

A modern private enterprise is faced with the issue of ensuring the protection of information that circulates in the enterprise. The analysis of scientific publications gives reason to claim that in connection with the increase in information flows at the enterprise, it is necessary to create an information protection service. Currently, the protection of information is more and more relevant to business entities that need to protect themselves from the leakage of their information.

Comprehensive protection of information in information and telecommunication systems involves the use of special legal, physical, organizational, technical and software and hardware means of information protection. Control over the above measures, responsibility for their implementation and implementation is entrusted to the information protection service of the enterprise. legal norms of information security [6].

**Company description.** ENERGOIL (Fig. 1) is a private oil refining company specializing in the production and distribution of oil in Ukraine. Petroleum products are extracted and stored in the company's

warehouses, while the head office handles the main important components of the business, such as management, accounting (spent and received) and delivery logistics. The main office is located in the city of Ivan-Frankivsk, Berehova street, bldg. 34.



Fig. 1. ENERGOI

The company provides the following services:

- supply of oil and products of its processing;
- management and calculation of oil consumption;
- effective conversion of oil into electricity;
- development of oil production methods;
- management and efficient sale of oil.

**General cyber protection plan.** The facility's security system is created to prevent unauthorized access to the territory. The object on which work with confidential information is conducted has a hierarchy of protection boundaries (territory – building – premises – information carrier – program – confidential information).

**Scheme of computers arrangement** (Fig. 2). In total, the building will have 64 computers, switches and all the necessary server equipment to provide the company's own server network.

**Protection of the territory and premises of the company.** First of all, protection of the premises itself and the equipment located in it is created. The main components that will be installed to protect the enterprise from possible threats:

- security alarm designed to detect attempts to enter the protected territory;
- engineering structures designed to create obstacles to the penetration of intruders (reliable doors, bars on windows);
- means of continuous surveillance implemented with the help of television video surveillance systems;
- organization of control of access to the territory of the object by identification using cards.
- soundproofing of premises
- installation of a backup power supply unit

**Protection of information within the premises of the company.** Access to information on specific computers will be limited as follows. The following persons have access to the computer of ordinary employees:

- the employee himself;
- head of the security department;

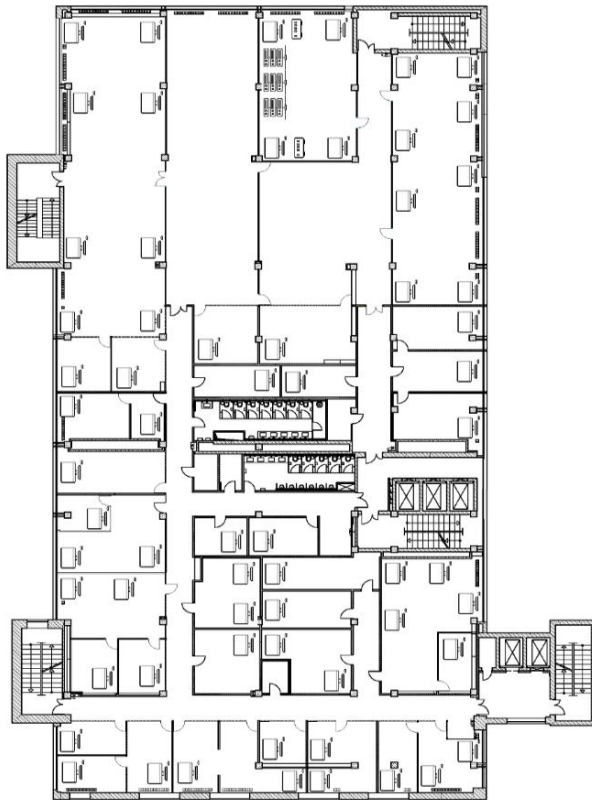


Fig. 2. Building scheme

- chief system administrator;
  - company director.
- Server room computers have access to:
- system administrator;
  - head of the security department;
  - company director.

Only the director himself has access to the company director's computer.

Within the access delimitation system, a dispatcher must be used, which performs access delimitation. This dispatcher is an employee of the security department. Access is restricted in accordance with the authority of employees. A request for employee access to a specific computer is sent to the database management and event registration unit. The authority of the employee and the characteristics of the object are analyzed by an employee of the security department. As a result, it gives a signal of permission or denial of permission ("Allow", "Reject"). If the number of "Refuse" signals exceeds a given level (for example, three times), which is fixed by the head of the security department, the dispatcher gives the "Unauthorized access" signal. Based on this signal, the system administrator blocks access to the computer until the reasons for unauthorized access are determined (Table 1).

#### Duties of employees to protect information at the enterprise:

- Responsible for alarm management: Security department.
- Responsible for unlocking and locking doors: Security department.
- Responsible for checking the backup power supply unit: Security department.

Table 1 – User accounts of enterprise workers

Office	Login	Password
<i>IT Department</i>	server1	5454322
<i>Secretary</i>	sek1	it13u22
<i>Director</i>	dir	it2rt322
<i>Accounting</i>	buhg3	it3re322
<i>Human Resources Dept</i>	kadr4	it4wf322
<i>Dept of economists</i>	ekon5	it53rr22
<i>Lawyer</i>	yuris1	sedfse77
<i>Storage</i>	stora32	gnid235
<i>Sales dept</i>	prod1	madir55
<i>Logistics dept</i>	progn1	bsdfh1sa
<i>Planning dept</i>	plan23	ssdhy234
<i>Security dept</i>	secr2342	bfsd432c
<i>Cooperation dept</i>	coopew11	auh5sde

- Responsible for access restriction: Dispatcher from the security department.
- Responsible for product distribution: Logistics department.
- Responsible for cryptological protection of information: IT department.
- Responsible for checking the functionality and security of work computers: System administrator of the IT department.

**Accounts of all users at enterprise** (Table 2). The first basic step for organizing work computers at the enterprise will be the creation of user accounts. For this, we create our own account for each computer

A user access matrix was developed for the ENERGOIL enterprise, divided by information departments. It is necessary in order to clearly understand which users have access to which.

At the enterprise, the access matrix has a division of information into types (6 of them in total) and the type of access to it. Types of access are used:

- R – More viewing information;
- RW – View and change information.

**Data encryption at the enterprise.** Although it is officially known as the Triple Data Encryption Algorithm (3DEA), it is more commonly referred to as 3DES. This is because the 3DES algorithm uses the Standard Encryption Standard (DES) cipher three times to encrypt its data.

DES is a symmetric key algorithm based on the Feistel network. As a symmetric key cipher, it uses the same key for both the encryption and decryption processes. The Feistel network makes both of these processes almost identical, resulting in a more efficient implementation of the algorithm [3].

DES has a 64-bit block and key size, but in practice the key provides only 56-bit security. 3DES was developed as a more secure alternative due to the short length of DES keys. In 3DES, the DES algorithm is performed three times with three keys, but it is only considered secure if three separate keys are used.

As the security weaknesses of DES became more apparent, 3DES was proposed as a way to increase its key size without building an entirely new algorithm. Instead of using a single key like DES, 3DES runs the DES algorithm three times, with three 56-bit keys.

- The key one is used to encrypt plain text.

Table 2 – Accounts of all users at enterprise

Department	Types of information					
	Not secret	Secret			Official use	
	General	Private	Financial	Legal	Technical	Personnel
IT Department	RW	RW	RW	RW	RW	RW
Secretary	RW	R	-	RW	-	RW
Director	RW	R	R	-	-	R
Accounting	R	-	-	-	RW	RW
Human Resources	R	-	-	-	RW	R
Economists	R	-	-	-	RW	R
Lawyer	R	-	-	RW	RW	R
Storage	R	-	-	-	RW	R
Sales dept	R	-	-	-	RW	R
Logistics dept	R	-	-	-	RW	R
Planning dept	R	-	-	-	RW	R
Security dept	R	-	-	-	RW	R
Cooperation dept	R	-	-	-	RW	R

- The second key is used to decrypt the text that was encrypted by the key.

- Key three is used to encrypt the text that was decrypted with the third key.

Encryption algorithms use keys to add data that will change the final result of the process. If DES only involves steps like permutation and S-boxes (permutation is explained below, while S-boxes are covered in the Substitution section), all an attacker has to do is reveal the details of the algorithm and then do each step in reverse order to reveal the original message [7].

### Presentation of the application

After starting the program, we see a window where you can immediately start working with encryption. We enter the text that we want to encrypt (Fig. 3).

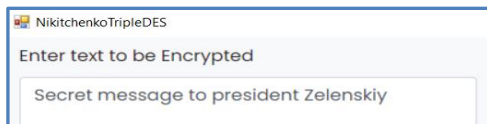


Fig. 3. Enter the text to be encrypted

Then choose the ECB or CBC encryption type. (Fig. 4). ECB stands for Electronic Code Book, while CBC stands for Cipher Block chaining. ECB is suitable for encryption small messages, while using CBC we can encrypt a large message. Usually it is used the CBC encryption at the enterprise, but this time it will be enough to use ECB.

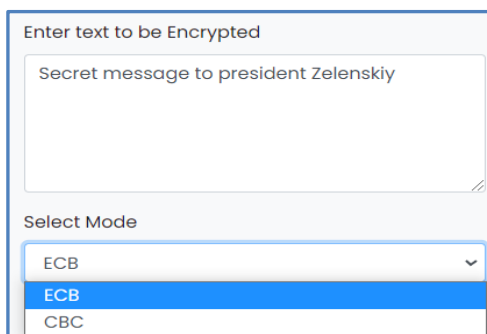


Fig. 4. Selection of entering the type of keys for encryption

We enter the encryption key and the type of cipher text at the output (it is not so important which one we choose, so we leave Base64). In Triple DES, it consists of three sets of keys. It can be three different sets, 2 the same and one different, or three identical sets of characters. The most effective is a set of three different keys, so we will use it (Fig. 5). To decrypt the received text, we take our pre-encrypted message and insert a field to decrypt the text, and specify the type of the entered encrypted message (in this case, Base64) (Fig. 6). Set the same settings and necessarily the same key that was used to encrypt the initial message. (Fig. 7).

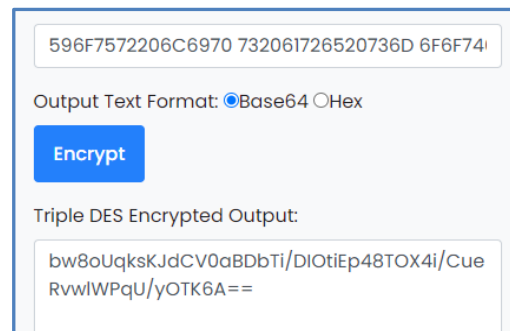


Fig. 5. The message is encrypted with the TDES algorithm

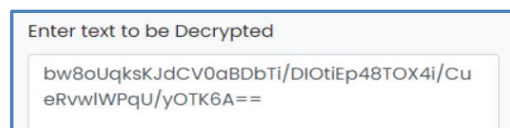


Fig. 6. Decryption text field

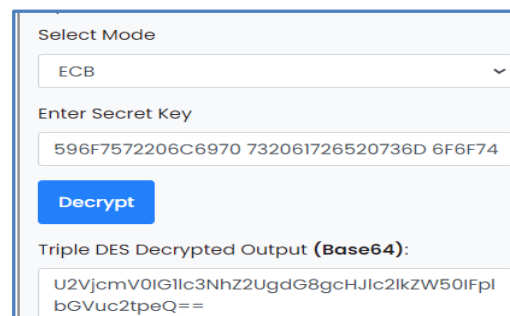


Fig. 7. Decryption settings

At the output, we have a message that, after being translated into plain text, is displayed on the screen and also written into a separate text file named "TripleDESdecrypted.txt" (Fig. 8).

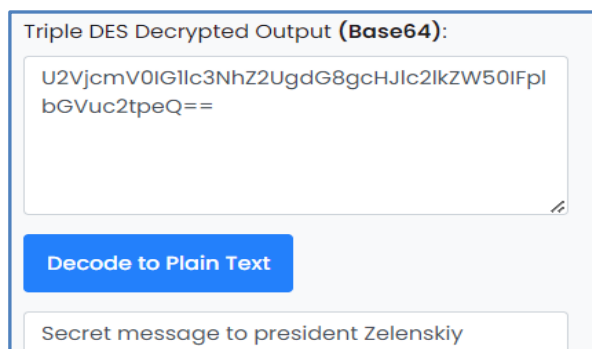


Fig. 8. The message is decrypted

At the end, this decryption is written to a file in the form of a simple message (Fig. 9).

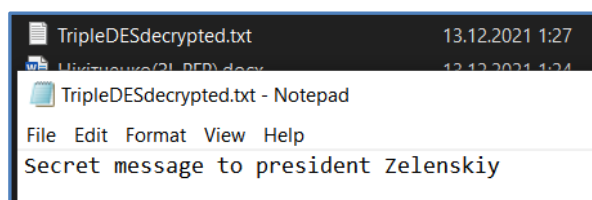


Fig. 9. The decrypted message is written to the file

## Conclusions

The organization of information protection at the ENERGOIL enterprise is all the measures taken to prevent the leakage of information that should not be known to outsiders. They concern both software and hardware. For the enterprise, a system has been created so that access to each specific computer is only available to a limited number of persons, such as employees in their own positions and system administrators. A password system and mandated access model were created. Information protection was also ensured at the registration levels with the help of basic programs understandable to ordinary users.

To protect against virus threats, the appropriate antivirus was selected, taking into account such characteristics as price, quality for its price, downloads to working machines, program efficiency and the size of virus databases, as well as their update frequency. For data encryption, an application based on the TDES algorithm was created, it was tested for encryption and decryption of a simple message. Triple DES cannot be called the best of all encryption algorithms in our time, but it is easy to use and quite reliable, because it is a complex version of another DES algorithm, which was previously accepted as a standard.

All comprehensive security measures for the ENERGOIL enterprise have been taken into account to provide adequate protection of information to the enterprise.

## REFERENCES

1. Data encryption using the XOR cypher G. Golovko, A. Matyashenko, N. Solopikhin - journal "Control, Navigation and Communication Systems". 2021. 81 p.
2. Technologies of information protection (UZHNU), URL - <https://www.uzhnu.edu.ua/uk/infocentre/get/4186>
3. TripleDES class and its implementation, URL - <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/api/system.security.cryptography.tripleDES?view=net-6.0>
4. Triple data encryption algorithm, URL - [https://wikicsu.ru/wiki/triple\\_des](https://wikicsu.ru/wiki/triple_des)
5. Cryptography (Encyclopedia of modern Ukraine), URL - [https://esu.com.ua/search\\_articles.php?id=1576](https://esu.com.ua/search_articles.php?id=1576)
6. Requirements for information protection services at enterprises, URL - <http://pyuv.onua.edu.ua/index.php/pyuv/article/view/607>
7. Analysis of the TDES encryption algorithm, URL - <https://instagalleryapp.com/informacijna-bezpeka/shho-take-shifruvannja-3des-i-jak-pracjue-des/>

Received (Надійшла) 05.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 09.11.2022

## Кіберзахист підприємства ENERGOIL

О. Шефер, Є. Нікітченко

**Анотація.** У статті йдеться про забезпечення комплексного захисту компанії по переробці та дистрибуції нафти ENERGOIL. Захист включає в себе такі компоненти, як шифрування, антивірусне програмне забезпечення та матриці доступу користувачів. У системі розмежування доступу обов'язково використовується диспетчер, який здійснює розмежування доступу. Запит на доступ співробітника до конкретного комп'ютера надсилається до підрозділу управління базами даних та реєстрації подій. Повноваження співробітника і характеристики об'єкта аналізуються співробітником служби безпеки. Першим основним кроком для організації роботи комп'ютерів на підприємстві буде створення облікових записів користувачів. Для цього створюється свій обліковий запис для кожного комп'ютера. Для підприємства «ЕНЕРГОІЛ» розроблена матриця доступу користувачів, розділена на інформаційні підрозділи. Це необхідно для того, щоб чітко розуміти, які користувачі до чого мають доступ. Для шифрування було використано алгоритм TripleDES. Суть алгоритму полягає у використанні опублікованого Національним бюро Стандартів США (NBS) стандарту шифрування даних Data Encryption Standard, простіше кажучи DES. Спочатку дані шифруються за допомогою першого ключа, розшифровуються назад другим ключем та зашифровуються повторно третім. Оскільки використовуються аж три ключі, фактично їхня сумарна довжина  $3 * 56 = 168$  біт. Швидкість шифрування також менша ніж у алгоритму DES, зате надійність не залишає ніяких сумнівів. Для взлому такого шифрування необхідно в мільярд разів більше спроб, ніж для простого DES. Для захисту від шкідливого програмного забезпечення було використано антивіруси Avastra Microsoft Windows Defender, а для розмежування доступу на робочих комп'ютерах, було створено матрицю доступу з аккаунтами користувачів та їх дозволами.

**Ключові слова:** кібербезпека, шифрування, алгоритм, TripleDES, доступ.

В. Р. Щеглов, О. І. Морозова

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

## МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ РОЗРОБЛЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ДЛЯ ГАРАНТОЗДАТНИХ СИСТЕМ ІНДУСТРІАЛЬНОГО ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

**Анотація.** Із розвитком виробництв через промислову революцію 4.0, активну цифровізацією аспектів життя від транспорту до торгівлі, доступності технологій як інтернет речей (IoT), штучний інтелект й хмарні обчислення, зростає попит на цифрові двійники (ЦД), які здатні підвищити безпеку й скоротити витрати шляхом збору даних, їх аналізу на моделях реальних об'єктів для прийняття ефективних рішень у реальному часі. Метою цієї статті є огляд концепції ЦД, аналіз ключових доменів разом із прикладами їх використання, особливостями, проблемами, обмеженнями та перевагами, а також формалізації загальних проблем та обмежень у ЦД. У роботі було розглянуто концепт ЦД, які допомагають у прийнятті рішень в реальному часі для підвищення ефективності роботи, а також пом'якшення або запобігання неочікуваних подій протягом життєвого циклу реального об'єкта. Існує три основні підходи до моделювання: фундаментальне моделювання, моделювання на основі даних і гібридне моделювання. Інший погляд на ЦД – це використання за ієрархією – двійники компонентів, майна, систем та процесів. ЦД можуть представляти прості датчики та насоси, або ЦД можуть бути як системи та об'єднувати і моделювати кілька виробничих підсистем. Концепція ЦД може бути застосована майже в усіх сферах діяльності, але в цій статті розглядаються найпоширеніші галузі, які можна вважати основними або які впливали на розвиток цифрових двійників. Проведено аналіз ключових індустриї для використання ЦД, визначено особливості та проблеми застосування у кожному із розглянутих доменів. Було сформульовано які існують загальні виклики, переваги та особливості у цифрових двійниках.

**Ключові слова:** цифрові двійники, індустрії цифрових двійників, індустрія 4.0, інтернет речей, прогнозне виробництво.

### Вступ

Сучасні виробництва стикаються із необхідністю адаптувати сучасні інформаційні технології до нових викликів і вимог ринку. Революція у виробництві, яка спрямована на досягнення максимальної ефективності через використання автоматизації, аналітики великих даних, прогнозованого обслуговування та IoT, зазвичай називають «промисловою революцією 4.0» (Industry 4.0) або «розумним виробництвом» [1]. Розумне виробництво може виконувати складні задачі без втручання людини, знижуючи витрати та підвищуючи безпеку працівників і обладнання, зменшуючи кількість відходів у середовищі, а також уникаючи втручання людини до небезпечних, брудних і важких робіт.

Цифрові двійники (ЦД) разом з інтернетом речей (IoT), аналізом великих даних, машинним навчанням (ML), кіберфізичними системами (CPS), розвиток 4G і 5G можна вважати ключовими факторами, що сприяють промисловій революції 4.0 [2]. ЦД спрямований на створення точної цифрової моделі фізичного об'єкта або процесу, яка здатна збирати інформацію з реального середовища, виконувати перевірку, оцінювання, оптимізацію та прогнозування на цій моделі перед безпечним застосуванням результатів на фізичний об'єкт або процес. Це допомагає у прийнятті рішень в реальному часі для підвищення ефективності роботи, а також пом'якшення або запобігання неочікуваних подій протягом життєвого циклу реального об'єкта [3].

Одна з перших концепцій ЦД була реалізована NASA в рамках програми «Аполлон». На її основі було побудовано два ідентичних космічних апарата – один із них встановився на космічному кораблі, а інший використовувався для віддзеркалення поведінки першого у різних умовах під час місії, щоб зазда-

легідь прийняти більш точні рішення для управління космічним апаратом [4]. Ідею ЦД вперше описав у 1991 році Девід Гелернтер у своїй книзі «Дзеркальні світи». А пізніше, у 2002 році, доктор Майкл Гривз представив і описав концепцію цифрових двійників [5]. Назва «Digital Twin» (DT) була представлена NASA в чернетці технологічної дорожньої карти в 2010 році як система моделювання «для відображення життя його літаючого двійника» [6].

Відтоді технологія ЦД привернула увагу дослідників і стала однією з ключових технологій у сучасному виробництві. У 2020 році розмір світового ринку ЦД оцінювався в 3,1 млрд доларів США [7], а до 2027 року очікується, що він досягне 63,5 млрд доларів США. За прогнозами IDC, з 2021 по 2027 рік кількість нових фізичних активів і процесів, які моделюються як ЦД збільшиться з 5% до 60%, що призведе до оптимізації операційної продуктивності [8]. Зі значним збільшенням числа інтелектуальних пристроїв, підключених до кіберпростору, зростанням популярності та розвитком хмарних обчислень, аналітики великих даних і машинного навчання, інтеграція ЦД стає більш природною та доступною для сучасних виробництв і бізнесу, які можуть зменшити час на розробку продуктів – від концепції до поставки, можуть оптимізувати діяльність, покращити безпеку, мати більше контролю та знизити витрати на обслуговування [6].

Метою цієї статті є огляд концепції ЦД, аналіз ключових доменів разом із прикладами їх використання, особливостями, проблемами, обмеженнями та перевагами, а також формалізації загальних проблем та обмежень у ЦД.

Зміст структуровано таким чином: у розділі 1 наведено огляд видів ЦД, у розділі 2 наведені використані джерел разом із їхньою класифікацією, аналіз цих джерел відповідно до класифікації описано в

розділі 3, загальний підсумок джерел і підходів у розділі 4. Далі наведено висновок і подальші напрямки роботи.

### 1. Огляд видів ЦД

ЦД активно розвиваються і формуються як сучасна технологія. Їй досі не вистачає стандартизації, інструментів, а іноді й успішно реалізованих прикладів в різних галузях, а також чітко визначеної термінології та визначень [9]. Оскільки ЦД працюють з гетерогенними системами, а також включають інші дисципліни та технології, їх можна класифікувати за різними аспектами. Розглянемо основні типи категоризації ЦД.

Одним із основних інструментів у ЦД є моделювання. Модель дозволяє виконувати обчислення, виконувати прогнозування збоїв, оптимізувати поведінку перед застосуванням до фізичного об'єкта. Існує три основні підходи до моделювання: фундаментальне моделювання, моделювання на основі даних і гібридне моделювання [9]. За допомогою **фундаментального моделювання** можливо створити складну модель відповідно до законів фізики, математики або хімії, вона вимагає менше даних, є більш загальною та може бути застосована до іншого двійника з такими ж фундаментальними характеристиками. Але це вимагає більше обчислювальних ресурсів і може бути неточним через деякі індивідуальні особливості конкретних об'єктів. У деяких випадках не можливо створити або знайти фундаментальну модель, або обчислювальні ресурси для фундаментальної моделі надто великі, або для створення точної моделі для конкретного об'єкта зі своїм набором індивідуальних характеристик. У цьому випадку можна застосувати **моделювання на основі даних (data-driven)**. В свою чергу **гібридне моделювання** – це компроміс між двома попередніми варіантами. Наприклад, навіть у випадках, коли можливе моделювання на основі даних, слід застосувати деякі основні фізичні закони для покращення якості моделі.

**Ієрархія ЦД.** Інший погляд на ЦД – це використання за ієрархією – двійники компонентів (part/component twin), майна (asset twin), систем та процесів (рис. 1) [6]. ЦД можуть представляти прості датчики та насоси, або ЦД можуть бути як системи та об'єднувати і моделювати кілька виробничих підсистем.



Рис. 1. Класифікація ЦД за ієрархією

**Інші види ЦД.** ЦД може використовуватися по різному протягом життєвого циклу продукту (ЦД прототип та ЦД сутність) [6]. Можна розділяти цифрові двійники за рівнем інтеграції – за зв'язністю та наявністю зворотного зв'язку між фізичним та цифровим двійником (Цифрова Модель, Цифрова Тінь, Цифровий Двійник) [6, 10]; за рівнем зрілості – описовий, інформативний, прогнозний, адаптивний ЦД, автономний/розумний ЦД (рис. 2) [6]; за архітектурою, структурою та багатьма іншими аспектами. Але в цій роботі ми зосередимося на контексті, сферах і галузях, де можна застосовувати ЦД.

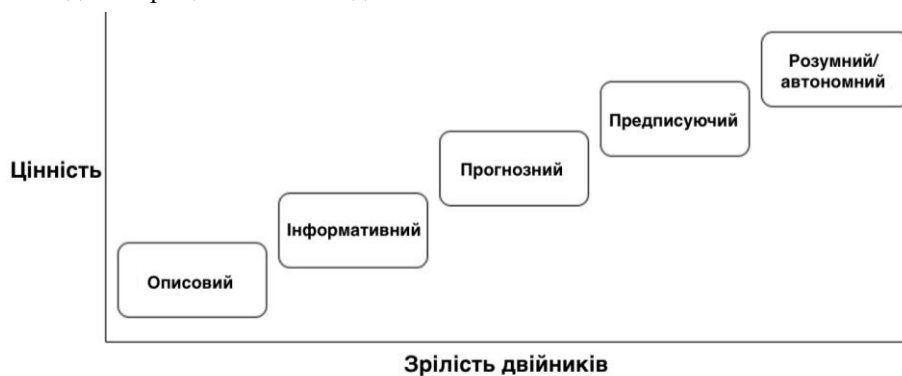


Рис. 2. Класифікація ЦД за зрілістю

**Огляд джерел за доменами ЦД.** Так, у пов'язаній роботі [3] було виконано аналіз тематичного моделювання ЦД, який надав чітку картину стосовно визначень та наукових напрямів ЦД, визначив 5 основних тематичних кластерів статей ЦД. Крім того, було застосовано аналіз формальної концепції, щоб зрозуміти тенденції та стратегії ЦД, де можна використовувати ЦД і які функції вони вико-

нують в різних галузях. Інша оглядова робота [11] намагається усунути неправильні уявлення щодо поточних і попередніх визначень ЦД, визначити, які є приклади застосування, виклики та сприятливі технології пов'язані з IoT/Industrial IoT (IIoT), аналітикою даних і ЦД. Роботи [12, 13] надають більш детальну інформацію про застосування ЦД у різних галузях, в тому числі промисловості.



## 2. Класифікація джерел

Концепція ЦД може бути застосована майже в усіх сферах діяльності, але в цій статті розглядаються найпоширеніші галузі, які можна вважати основними або які впливали на розвиток цифрових двійників. Таким чином, було переглянуто низку оглядових робіт щодо ЦД, щоб зрозуміти найбільш обговорювані домени з точки зору (табл. 1). Виробництво, розумні міста та галузі охорони здоров'я можна знайти майже в кожній оглядовій статті чи роботі ЦД. Табл. 1 це підтверджує. Автомобільна та аерокосмічна промисловість завершують п'ятірку найбільших за популярністю ЦД галузей. Це галузі були обрані основними для огляду для поточної статті. Ще три галузі будуть розглянуті через цікаві роботи та для поширенню контексту при аналізі індустрії ЦД, а саме освіта, будівництво та залізничний транспорт. Було розглянуто додаткові роботи із конкретними прикладами впровадження ЦД у кожній із індустрій.

Таблиця 1 – Галузі та оглядові роботи, в яких ці галузі аналізувалися

	Галузь	Оглядові роботи
1	Аерокосмічна	[12, 3, 6]
2	Автомобільна	[12, 6, 13]
3	Виробництво	[12, 3, 6, 10, 2, 13, 11]
4	Гірничодобувна	[12]
5	Морський транспорт	[12, 3]
6	Енергетика	[12, 10]
7	Паливна	[12]
8	Сільське господарство	[12, 6]
9	Розумні міста	[12, 3, 6, 10, 13, 11]
10	Освіта	[12, 6]
11	Медицина	[12, 3, 6, 13, 11]
12	Торгівля	[12]
13	Будівництво	[12]
14	Транспорт	[10, 13]

Повний перелік галузей, які будуть розглянуті, і пов'язані роботи можна знайти в табл. 2.

Таблиця 2 – Перелік індустрій для огляду та аналізу

#	Галузь	Роботи за напрямками
1	Виробництво	1. Оглядові статті, що включають галузь [2, 3, 6, 10-13] 2. Discovering the Digital Twin Web – From singular applications to a scalable network [14] 3. Towards a Cyber-Physical Manufacturing Cloud through Operable – Digital Twins and Virtual Production Lines [15] 4. A Digital Twin for the Logistics System of a Manufacturing Enterprise Using Industrial IoT [16] 5. Digital representations of physical assets [17] 6. An Integrated Mobile Augmented Reality Digital Twin Monitoring System [18] 7. The Fundamental Approach of the Digital Twin Application in Railway Turnouts with Innovative Monitoring of Weather Conditions [19]
2	Автомобільна	1. Оглядові статті, що включають галузь [6, 12, 13] 2. Traffic Safety Detection System by Digital Twins and Virtual Reality Technology [20] 3. Automotive overview - Top 5 Use Cases of Digital Twin in Automotive Industry in 2022 [21]
3	Медицина	1. Оглядові статті, що включають галузь [3, 6, 11-13] 2. Best Digital Twin Applications & Use Cases in Healthcare in 2022 [22] 3. A Novel Cloud-Based Framework for the Elderly Healthcare Services Using Digital Twin [23]
4	Аерокосмічна	1. Оглядові статті, що включають галузь [3, 6, 12] 2. UAV, Using Digital Twins and Drones to Capture Physical Environments [7] 3. Structural Digital Twin of the UAV that was used to monitor vehicle structural health and drive dynamic flight planning decisions [24] 4. Shaun Waterman. Air Force Goes All in on Digital Twinning – for Bombs As Well As Planes [25]
5	Розумні міста	1. Оглядові статті, що включають галузь [3, 6, 10-13] 2. The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning [26] 3. A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities - [27] 4. Smart Cities with Digital Twin Systems for Disaster Management [28] 5. City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda [29]
6	Освіта	1. Оглядові статті, що включають галузь [6, 12] 2. Development of a digital twin of a flexible manufacturing system for assisted learning [30] 3. Tangibles and Digital Twins: Toward Meaningful Learning Support in Cyber- Physical System Development [31]
7	Будівництво	1. Оглядові статті, що включають галузь [12] 2. Building Lifecycle Management, Cognitive Digital Twins [32] 3. Options for and Challenges of Employing Digital Twins in Construction Management [33]
8	Залізничний транспорт	1. Оглядові статті, що включають галузь [10, 13] 2. Digital twins for managing railway maintenance and resilience [40] 3. Digital Twins in Railways [41] 4. The Fundamental Approach of the Digital Twin Application in Railway Turnouts with Innovative Monitoring of Weather Conditions [42] 5. Towards a Data-driven Operational Digital Twin for Railway Wheels [43]

### 3. Аналіз джерел та підходів з а різними індустріями ЦД

Для визначення переваг і проблем у ЦД, а також сформульовані загальних викликів і особливостей, було прийнято рішення проаналізувати ключові й деякі відносно нові індустрії по використанню ЦД.

Це дозволить більш широко дивитися на можливості технології та перевикористання підходів із різних доменів ЦД. У цьому розділі будуть детально розглянуті та проаналізовані обрані галузі ЦД. Кожен із параграфів по галузі містить загальний опис, особливості цього домену, проблеми та приклади використання.

**3.1. Виробництво.** Сьогодні виробництво є найпопулярнішою сферою для прикладів із впровадження та інтеграції цифрових двійників. Цей сектор включає різні формати використання ЦД на кожному із етапів життєвого циклу продукту – від проектування та створення прототипу до виробництва, логістики та обслуговування. ЦД може допомогти з прогнозуванням відмови обладнання, контролем точності та продуктивності виробництва, оцінювати концепції перед їх впровадженням, а також покращувати досвід користувачів через візуалізацію [3]. Очікується, що ЦД стане головним інструментом в MBSE (model-based systems engineering) або системній інженерії на основі моделі, оскільки ЦД можна застосовувати на кожному етапі життєвого циклу системи/продукту. Цілком можливо, що вироблені продукти матимуть свої ЦД, які допоможуть у забезпеченні ефективної підтримки продукту та персоналізованого обслуговування та досвіду використання [6].

Одним із викликів у виробничих системах є автоматизація та масове виробництво економічно ефективним способом. ЦД може допомогти в оцінці та аналізі ефективності виробництва, а також кожного із факторів проектування на етапах життєвого циклу.

В роботі [2] було запропоновано модель із 3 типами застосувань у цехах, які фокусуються на різних аспектах виробництва:

- ЦД продукту – вихід або результат виробничого процесу;
- ЦД процесу – робочий процес виробничої лінії, як працює процес;
- операційні ЦД – моніторинг, операційні процедури та контроль;

В іншій роботі пропонується додати ще 4-й пункт до розглянутої класифікації – утилізація та переробка відходів [12].

У дисертаційній роботі [15] пропонується працездатна модель ЦД кіберфізичної виробничої хмари, яка успадковує функції моніторингу із хмари, що відкриває двері для майбутніх виробничих систем. В рамках дисертаційної роботи [14] були побудовані ЦД, орієнтовані на дизайн виробничого обладнання, зокрема на промислового мостового крані. У роботі [17] було представлено набір інструментів FA3ST (Fraunhofer-advanced AAS tools for digital twins) як репрезентативну реалізацію загальної та гнучкої архітектури для управління ЦД, яка фокусується на функціональності на завершальній стадії виробництв.

ЦД також можуть бути корисними під час навчання інженерів або для допомоги та контролю низькокваліфікованих операторів. Операторам потрібні глибокі знання обладнання, щоб швидко приймати важливі рішення під час технічного обслуговування або виробничих процесів. У статті [18] пропонується використовувати мобільну систему віддаленого моніторингу доповненої реальності, щоб допомогти операторам із низькою кваліфікацією полегшити робочий процес. Таку систему було побудовано для баштового крана.

Логістика – ще одна проблема сучасного виробництва. У статті [16] автори розглядають застосування ЦД для логістичної системи виробничого підприємства з використанням ІоТ. Також було розглянуто кейс для ПрАТ «ФЕД». Система була розроблена з метою розрахунку оптимального розташування виробничих потужностей для максимізації продуктивності на виробництві.

ЦД у виробництві мають власний перелік проблем:

- проблема роботи ЦД у режимі реального часу – виробництво вимагає швидкої реакції. В той же час ЦД потребує потужності для моделювань та передбачень
- великі дані – величезна кількість субдоменів та взаємозв'язків ускладнює систему та видає великий потік даних.

**3.2. Автомобільна галузь.** Сучасні автомобілі вже оснащені великою кількістю телеметричних датчиків, що генерують величезну кількість даних для подальшого аналізу – таким чином сучасні авто вже більше менш відповідають необхідному рівню цифровізації та готові для впровадження ЦД. Проте це лише частина системи ЦД, і цей сектор активно розвивається. Переважна кількість існуючих робіт зосереджено на процесах виробництва та прототипування, а також валідації характеристик майбутніх автомобілів [13]. Більшість рішень із виробничого сектору ЦД можна також застосувати і в автомобільному виробництві, але автомобільна промисловість має свої особливості.

Виробники можуть скористатися функціями прогнозованого технічного обслуговування. Це стосується не тільки виробничих робіт, а й технічного обслуговування автомобілів [6, 12, 21]. ЦД можуть зменшити витрати та кількість помилок шляхом застосування віртуального тестування для перевірки автомобіля [13]. Механіки можуть надавати швидші та більш персоналізовані рішення за коротший час.

Службам прокату буде легше слідкувати за станом автомобіля у реальному часі [6]. ЦД також використовується для отримання більш персоналізованого досвіду водіння автомобіля – виробники можуть аналізувати поведінку водія та налаштувати під них автомобілі або надавати індивідуальні функції, які задовольняють потреби клієнтів [12]. Іншим фактором є покращення досвіду продажів – покупці можуть перевірити продукт у різних конфігураціях та поведінку за допомогою симуляції, інструментів VR та AR, що стимулюють продажі через створення позитивного досвіду користувача [12, 21].

Деякі сучасні автомобільні компанії вже інтегрували ЦД у свій бізнес. Tesla Motors використовує ЦД у кожному автомобілі. Це дозволяє швидко онолювати автомобіль відповідно до виявлених індивідуальних проблем, як наприклад, віддалено компенсувати проблеми з дверима шляхом налаштування гідравліки [12]. Volkswagen використовує ЦД з одним зі своїх роботів при плануванні виробництва. Це економить близько трьох тижнів часу та 40 квадратних метрів виробничої площі [12]. Maserati також інтегрувала ЦД у свій виробничий процес, щоб оцінити, як зміни автомобіля впливають на виробничі процеси [12]. Крім того, у роботі [20] досліджується прогнозування типів водіння транспортного засобу для підвищення точності визначення безпеки руху.

Величезні дані, які генеруються автомобілями, можна вважати одним із головних викликів. Підраховано, що компанії аналізують лише 12% доступних даних [21]. Це означає, що ефективну модель неможливо побудувати з такою низькою швидкістю обробки даних.

Крім того, сам автомобіль може бути оффлайн, тому необхідно обробляти це відповідним образом. Іншою проблемою є безпека – атака на ЦД автомобілів на сервері, що впливає на рішення, або навіть керує автомобілем, може поставити під загрозу процес водіння в цілому.

**3.3. Медицина.** У секторі охорони здоров'я ЦД можуть покращити ефективність організації, забезпечити більш персоналізоване лікування та контроль. Рішення на основі ЦД у медицині можуть підвищити точність аналізу стану організму та встановлення діагнозу, допомогти з розподілом медичних ресурсів та хірургічним асистуванням, лікарі можуть призначати плани лікування на основі даних у реальному часі. Для пацієнтів ЦД може контролювати та аналізувати стан їхнього тіла та надавати зворотний зв'язок у режимі реального часу.

ЦД в медицині можна розділити на три основні категорії [22]:

1) **ЦД закладу охорони здоров'я.** ЦД можна використовувати для створення лікарні-двійника, щоб зрозуміти, як справлятися з труднощами в різних ситуаціях, наприклад, пожежа в будівлі або надмірна потреба в травматичних кабінетах. Крім того, ЦД може допомогти з управлінням активами та обладнанням, як в випадку, щоб зрозуміти, чи є дефіцит ліжок чи іншого обладнання під час пандемії в поточний момент;

2) **ЦД організму людини.** Віртуальні двійники тіла або його компонентів забезпечують більш детальне уявлення про фізіологічний стан, що дозволяє точніше та персоналізовано діагностувати хвороби та планувати лікування. Крім того, такі рішення можуть допомогти виявити патології та інші захворювання ще до того, як порушення стануть очевидними – як приклад прогнозного лікування;

3) **ЦД для медицини та розроблення пристроїв.** На етапі розроблення нового медичного пристрою завжди важливо оцінити та перевірити, як він працює та чи відповідає певним критеріям. ЦД можна використовувати для практичного тестування

нових пристроїв або функцій перед їх використанням. Ту саму концепцію можна застосувати й до ліків – віртуальні біохімічні моделі ліків можуть допомогти вченим у модифікації або розробленні нових методів лікування.

Концептуальну модель людського ЦД або human digital twin (HDT) було розглянуто в [13]. Ідея полягає в тому, щоб відтворити тіло людини в кіберфізичному просторі. Дані з датчиків і медичних карт постійно аналізуються та використовуються для надання більш персоналізованого лікування або моніторингу стану організму. Робота [13] розглядає деякі приклади HDT, такі як вимірювач серцебиття, вимірювач кроків та ін. SmartFit допомагає з персоналізованими порадами та відстеженням стану тіла. Іншим застосуванням є хірургічне планування та виконання [11]. ЦД були використані для створення «Cardio Twin» для запобігання ішемічній хворобі серця та інсульту [6]. Стаття [23] пропонує нову концепцію ЦД охорони здоров'я, яка була створена для впровадження таких послуг, як моніторинг у режимі реального часу для людей похилого віку. Крім того, в цій роботі [23] стверджує, що дослідження моделювання охорони здоров'я зосереджені переважно на освіті в галузі охорони здоров'я, а більшість досліджень ЦД у медицині зосереджено на платформах для моніторингу.

Сфера охорони здоров'я має свої проблеми. Однією з найпоширеніших проблем є безпека даних. Під час лікування, аналізів збирається значна кількість індивідуальних даних, які слід зберігати та обробляти безпечним способом. У деяких випадках лише клініки можуть зчитувати дані пацієнтів, а це означає, що моделювання та прогнозування можна виконувати лише локально в клініках або із обфускованими та анонімованими даними. Крім того, якість даних і злиття даних (data fusion) – це більш загальні проблеми, актуальні для всіх напрямів ЦД [22]. З медичної точки зору іноді біологічні явища погано вивчені або їх важко змоделювати, наприклад проблема моделювання емоцій. Тому експертна валідація моделей є дуже важливою для оцінювання надійності моделей, а також для якості їх роботи [13]. Ще одна досить цікава тема, яка може бути проблемою, це проблема соціальної етики [13]. Наприклад, як сприймають люди факт масової цифровізації внутрішніх частин і процесів тіла для проведення подальших моделювань?

**3.4. Аерокосмічна галузь.** ЦД також використовуються в аерокосмічній промисловості. Аерокосмічні компанії почали використовувати ЦД, щоб мінімізувати час простою двигунів і компонентів, використовують переваги прогнозованого технічного обслуговування, а також використання віртуального моделювання для перевірки поведінки літаків і кораблів в різних середовищах та умовах, наприклад, в екстремальних погодних умовах [3]. ЦД можна використовувати на етапі виробництва для розроблення та тестування продуктів. Моделювання та тестування з точки зору оптимізації продуктивності також є місцем для використання ЦД [12].

Переваги можна формалізувати таким чином:

- безпечніші місії, максимізується точність та їх успішність;
- дешевші космічні апарати, менші витрати на експлуатацію та обслуговування;
- перевірка продукту та його моделювання перед виробництвом.

NASA розробило ЦД ракетного двигуна для прогнозування умов польоту, впливу цих умов і способів оптимізації запуску двигуна [12]. Крім космічних кораблів і літаків, безпілотні літальні апарати (БПЛА) можуть розглядатися як предмет інтеграції ЦД в рамках аерокосмічної сфери. Але сам БПЛА часто використовується як інструмент для впровадження нових ЦД. Наприклад, робота [7] містить огляд того, як БПЛА можна використовувати для захоплення фізичного середовища та зйомки ЦД дахів, зйомки полів, щоб аналізувати стан рослин. [24] провели дослідження із використання ЦД БПЛА для моніторингу його справності та динамічної зміни рішень щодо планування польоту відповідно до стану та рекомендацій моделі машинного навчання – такий концепт використання масштабується і на літаки з космічними кораблями.

Ще один спосіб використання ЦД в аерокосмічній галузі – це моделювання та випробування нових кораблів перед вибором найкращого варіанту для виробництва. Наприклад, реактивний літак повітряних сил США F-7 Red Hawk був розроблений і випробуваний з використанням концепції ЦД [25]. Тобто валідація концепту із конкурентами та оцінювання його ефективності були ще проведені до моменту виробництва прототипів.

Аерокосмічну галузь можна віднести до систем реального часу або критичної інфраструктури. Тому вимоги до безпеки та відклику мають бути на високому рівні.

Одним із викликів аерокосмічної галузі є комунікації. ЦД вимагають величезної кількості даних для передачі з кораблів у хмару та у зворотному напрямі. Тому обговорюється можливість застосування 5G для зв'язку. Через значний обсяг даних, тут зустрічаються й відповідні загальні проблеми в обробленні даних. Крім того, відсутність відповідних знань про проектування ЦД, інструментів і стандартизації може бути проблемою для інтеграції ЦД в аерокосмічну галузь.

**3.5. Розумні міста.** Міста стають розумнішими та вони виробляють інформацію з різних джерел, таких як вуличні камери, міський транспорт, управління водопостачанням, розумні світлофори тощо. ЦД у індустрії містобудування в основному зосереджені на покращенні середовища та якості життя громадян, мобільності та доступності послуг для громадян, безпеці, та щоб технологічний прогрес був орієнтований на людей [3, 13]. Подібно до виробництва, розумні міста включають широкий спектр субдоменів – від транспорту до міського планування. Близько 118 міст використовували ЦД у проєктах Smart City [10].

Оскільки ЦД у місті часто використовуються для фізичного моделювання, можна виділити наступні технології, які дозволяють будувати такі моделі: фотографія зі зсувом та нахилом, безпілотний літальний апарат (БПЛА), 3D лазерне сканування та система глобального позиціонування (GPS) [27]. Ще один важли-

вий технологічний фактор – 5G зв'язок, що допомагає з'єднати в одну мережу різні частини розумного міста [27].

**ЦД для управління і соціального контролю міста.** Через цифровізацію процесів, збір даних та можливість моделювати різні сценарії, ЦД стають важливим інструментом в управлінні міста. Влада міста може приймати оптимальні рішення, опираючись на дані, отриманні з моделі. Крім того, відкриті дані та моделі міст є в тому числі й інструментом соціального контролю або демократії, оскільки в такому випадку кожна людина може перевірити забруднення повітря біля будинку, чому в її районі більше ДТП, або чому температура поверхні вулиці (будівлі, дороги) значно більша за сусідню вулицю, що може потім переходити у конкретні запити або дії по усуненню проблеми. Робота [27] розглядає концепцію ЦД міста і те, як вона може змінити структуру та правила управління містом.

**ЦД міста для безпеки та досліджень.** ЦД можуть будувати моделі руху людей і автомобілів, щоб знайти рішення для надзвичайних ситуацій і підвищити ефективність транспортної системи. 3D-моделювання та твіннінг (створення двійників) будівель можуть допомогти створювати якісні моделі якості повітря та моніторингу або прогнозування температури повітря в різних частинах міста у відповідь на погодні умови, стихійні лиха чи різні міські сценарії [3]. Усе це дозволяє підвищити громадську безпеку, покращити мобільність громадян, зменшити витрати та викиди вуглекислого газу, а також допоможе пом'якшити негативний вплив різноманітних аварій та катастроф [10]. Так одна із зон використання «розумного міста» – це стихійні лиха, які негативно впливають на громадські системи, завдаючи шкоди інфраструктурі, переміщуючи населення та порушуючи окремі системи та їхню взаємодію. В роботі [28] розглядаються ЦД розумного міста для моделей управління катастрофами. Також, у роботі [12] зазначено, як ЦД району Доклендс у Дубліні був побудований для прогнозування повеней і попередження людей про можливі повені.

В той же час, ЦД можна використовувати для планування та моделювання типових процесів у місті – від кількості туристів до прогнозування температури. В роботі [26] автори описали ЦД міста Цюріха, що використовується від дослідження урбанізації віртуального туризму та дослідження багатопверхівок до симуляції шуму на вулицях, забруднення повітря та випромінювання мобільних телефонів. У 2018 році Національний дослідницький фонд Сінгапуру створив віртуальну модель міста, що поєднує 3D-карти та платформу даних із деталями про текстури, будівельні матеріали, геометрію та інші компоненти [12]. Вважається, що таке моделювання буде корисно урядом, громадянам і дослідникам для управління. Міста швидко змінюються, вони постійно розвиваються, і такі технології можуть не тільки покращити якість життя та безпеку, але й зробити життя більш зрозумілим, оскільки кожен може отримати доступ до різних симуляцій міста, даних із відкритою статистикою.

З точки зору викликів, домени розумних міст пов'язані з проблемами даних: одна з найбільших

проблем – це складність і оброблення даних. Розумне місто являє собою гетерогенну систему з широким спектром підсистем і субдоменів, які потребують високого рівня інтеграції. Інша проблема полягає в точності побудови моделі, відсутності деталей для складного моделювання в рамках усього міста за різними аспектами. Також, через те, що місто є середовищем, в якому живуть люди, виникає проблема приватності через надмірну цифровізацію всіх аспектів міського життя.

**3.6. Освіта.** Останнім часом активніше в галузі освіти почали застосовувати ЦД. Основними інструментами є симуляції та технології AR, VR. Вони можуть покращити досвід навчання, візуалізуючи різні аспекти процесів та надаючи можливість взаємодії із змодельованою системою, що призводить до кращого розуміння. Крім того, це може зменшити витрати. Ось деякі з переваг ЦД в галузі освіти:

- покращена доступність – можна отримати віддалений доступ до обладнання;
- вирішує проблему з обмеженими ресурсами, оскільки кожен студент може мати персональне віртуальне обладнання;
- можливість автоматизації системи оцінювання та отримання зворотного зв'язку в режимі реального часу;
- поліпшення досвіду навчання, покращена мотивація та інтерес до процесу навчання;
- безпека для учнів та обладнання;
- здатність навчатися у віртуальних умовах, які важко організувати в реальному житті.

Більшість робіт, які пов'язані із ЦД, згадують освіту як одну з проблем бізнесу чи виробництва. Наприклад, допомога малодосвідченим операторам або підготовка інженерів до майбутньої роботи. У дослідженні [30] пропонується використання ЦД як альтернативної навчальної платформи для курсів виробничої техніки. Автори зосереджені на високоякісному відтворенні фізичної системи, що покращує інформативність від спостереження за процесами та більш детального вивчення учнями. Робота [31] представляє спосіб розробки міждисциплінарної інженерної програми, обговорюючи спільні риси між розробкою CPS (Clicks Per Second) тестів та освітою для розвитку. Подібний підхід був використаний для створення тестового стенда ЦД для студентів, які можуть досліджувати складності та поведінку системи, взаємодіючи з цим ЦД інженерної системи [12].

Одним із викликів застосування ЦД в освіті є точність відтворення та моделювання процесів та обладнання, щоб студенти могли зрозуміти, як воно працює з необхідним рівнем деталізації, уникаючи помилкового досвіду навчання. Крім того, важко оцифрувати деякий досвід навчання, як наприклад ручне навчання, або роботи в команді. ЦД в освіті – це чудовий інструмент для підвищення продуктивності, мотивації та безпеки студентів під час навчального процесу.

**3.7. Будівництво.** Будівництво – це трудомістка та затратна за часом галузь. Крім того, генерується величезна кількість даних у процесі будівництва – від проектування та планування до фізичного роз-

роблення будівлі та її перевірки. Сучасні проекти стають все більшими та складними, ними стає все важче керувати, до того ж сучасні будівлі часто необхідно перевіряти на енергоефективність, безпеку, інтегрувати автоматичні системи вентиляції, опалення, встановлювати різні датчики та інші пристрої. Все це необхідно вміти спроектувати, побудувати та розмістити значну кількість даних у потрібному місці, оброблюючи їх та отримуючи користь від цих даних.

Підходи із ЦД можуть допомогти у більш чіткому контролі та валідації якості процесів будівництва для команд інженерів, а також надасть можливість заздалегідь та більш комплексно оцінити хід робіт, та деякі особливості зацікавленим сторонам, як наприклад інвесторам або майбутнім клієнтам.

Як і у виробництві, так і у будівельній галузі ЦД можуть використовуватися на різних етапах життєвого циклу проекту. Використання ЦД може допомогти на етапі прототипування для перевірки та тестування проектів, це може перевірити деякі особливості, стійкість і поведінку у різних умовах ще перед початком будівництва. Крім того, це може допомогти безпечно застосувати зміни до проекту в середині будівництва через деякі термінові ситуації [12]. Після будівництва існуючу модель можна використовувати для посилення у разі надзвичайних ситуацій, для підтримки будівлі у ході експлуатації тощо. Часто ЦД є частиною вже існуючих Building Information Modeling (BIM) систем.

**ЦД для безпеки й контролю процесів будівництва.** Безпека й контроль йдуть нерозривно із життєвим циклом будівництва. В багатьох роботах пропонується поєднати у єдину систему управління сам проект, а також оцінювання й контролю якості. Так, згідно з роботами, розглянутими в [33], ЦД можуть покращити планування будівельних проектів, здатність швидко вирішувати конкретні потреби та проблеми, такі як фактори вібрації, коливання температури, прогнозувати поведінку у несподіваних подій, допомагати менеджерам у прийнятті рішень та контролі у ході будівництва та експлуатації або зменшити ризики. В роботі [32] автори досліджують застосовність, сумісність та інтегрованість адаптованої моделі когнітивного ЦД для управління життєвим циклом будівлі. В іншій пов'язаній роботі розглядається література з управління будівельними проектами через призму ЦД [33]. Автори пропонують триетапну структуру для аналізу та контролю за розвитком ЦД у будівельному секторі. У роботі [39] було запропоновано модель використання ЦД для контролю процесів на об'єкті – сенсори, візуалізація поєднуються із моделлю для автоматичної синхронізації будівельних робіт та підвищення безпеки.

Будівельний сектор стикається з тими ж проблемами, що й виробництво та сектори розумних міст. Багато концепцій взято з цієї області для вирішення проблем будівництва. Але будівництво часто нерозривно йде із досвідом майбутніх користувачів, стейкхолдерів, що потребує якісних інструментів контролю та візуалізації, то ж цей сектор, частіше використовує AR, VR технології, разом із різними симуляціями для пок-

риття цих потреб. Застосування нових технологій, таких як ЦД, може підвищити безпеку, зменшити витрати на будівництво, покращити планування і контроль, відкриваючи нові можливості для більш складних проєктів, як ще більші мости, дамби та тунелі.

**3.8. Залізничний транспорт.** Зі зростанням населення збільшується й попит до стійких рішень та ефективного управління транспортними системами. Залізниця вважається екологічно чистим («зеленим») видом транспорту порівняно з іншими, як автомобілі, літаки, кораблі тощо. Із активним просуванням концепції збалансованості (sustainability), підвищується й попит до екологічно чистих перевезень. Для контролю вибросів, підвищення ефективності потоків пасажирів та транспорту, прогнозування збоїв та контролю ресурсів і обладнання, необхідно підвищити рівень цифровізації системи у цілому, а також запроваджувати сучасні технології як ЦД.

Як і у багатьох секторах ЦД у залізничній сфері може бути застосований на різних етапах життєвого циклу (проєктування, реалізація, експлуатація).

На **етапі проєктування** актуальні вже розглянуті схожі підходи – це створення моделі, тестування та валідація деяких аспектів ще до початку виробництва. Наприклад, інструменти Bentley OpenRail від Siemens дозволяють проєктувати залізничні проєкти виключно у цифровому форматі, створюючи не тільки 3D та CAD моделі, а й моделі фізичних активів для моніторингу, та перевірки гіпотез. Або DigitalTrains інструмент від DVRS, що дозволяє створювати моделі залізничного полотна із пересувним складом, моделювати поведінку на поворотах або при використанні упорів для зупинки транспорту.

**Етап реалізації** проєкта тісно пов'язаний із попереднім, та може часто використовувати єдину систему. Так, наприклад, у роботі [40] пропонується використовувати підходи BIM (Building Information Modeling) систем у поєднанні із ЦД для чіткого контролю, верифікації та оптимізації процесів на будівництві об'єкту. Крім того, таке середовище покращує можливості для співпраці між командами та відділами через єдине віртуальне середовище.

Тепер розглянемо основні напрямки у **етапі експлуатації** [41]:

- технічне обслуговування, моніторинг та безпека – прогнозне обслуговування та моніторинг поїздів, залізничного полотна, обладнання, вузлів та ін.;
- планування трафіку – управління потоками транспорту та пересування пасажирів/вантажів;
- управління та політика – управління фізичними активами (рухомий склад та інфраструктура), загальні бізнес процеси на станції;
- обслуговування пасажирів – аналіз поведінки пасажирів для покращення досвіду користувача у період очікування та посадки, додаткової інформативності та навігації по станції.

**ЦД для безпеки залізничного транспорту.** Кожен аспект важливий, в той же час у роботі [40] після аналізу джерел за напрямком вказано, що більшість наукових робіт виконано саме у аспекті безпеки та підтримки роботи залізничних шляхів, вагонів та обладнання. Три основні фактори

сприяють виникненню дефектів на найбільш вразливих компонентах як залізничні компоненти, стрілочні переводи та провідні рейки залізничних колій і залізничного складу:

- несподівані ситуації, що виникають під час експлуатації та обслуговування;
- вплив навколишнього середовища;
- стирання та ерозія, що спричиняє пошкодження.

Саме тому більшість робіт сфокусована або на створенню ЦД для залізничних вузлів, щоб виконувати прогнозне передбачення та моніторинг, або схожі дії тільки до критичних компонентів пересувного складу як колеса, трансмісія та зчпні пристрої. Так у роботі [42] було проаналізовано та створено ЦД для залізничних стрілок, що збирає дані про навколишнє середовище, температуру, вібрації та стан самого компонента. Все це використовується у моделі для прогнозного обслуговування та моніторингу критичного вузла. Іншими прикладом [43] може бути схожа реалізація ЦД для коліс складу, що прогнозує відмови, або попереджає у разі знайдених аномалій у даних.

#### 4. Висновки за оглядом напрямків

ЦД все ще є досить новою концепцією, яка активно розвивається, але існує широкий спектр успішних впровадження та прикладів, де ЦД вже впроваджено та почало приносити переваги з точки зору безпеки, зниження витрат, прогнозованого обслуговування та оцінки концепції.

Відповідно до зробленого огляду та аналізу можна зробити висновок, що провідними галузями промисловості з точки зору дослідження та впровадження ЦД є: виробництво, розумне місто, охорона здоров'я, аерокосмічна та автомобільна промисловість. Однак ЦД все активніше застосовуються в освіті, будівництві, залізничному транспорті та інших сферах. У табл. 3 підсумовано основні характеристики та проблеми для кожного розглянутих доменів. Багато концепцій і проблем ЦД є загальними для галузей. Це тому, що існує багато проблем, які ортогональні до доменів і можуть бути застосовані до будь-якої галузі. Наприклад, ЦД як інструмент для навчання можна використовувати для підготовки автомобільних інженерів або щоб допомогти дослідникам вивчити та візуалізувати деякі процеси.

Іншим аспектом, який виділяється в кожній галузі техніки, є застосування ЦД на різних рівнях протягом життєвого циклу розроблення продукту. Як під час створення медичного пристрою, так і під час будівництва нової будівлі початковий прототип може бути протестований, припущення підтверджене у віртуальному середовищі, перед початком виробничого процесу. І двигуни літака, і виробнича машина вимагають технічного обслуговування, яке можна оптимізувати за допомогою ЦД і методів прогнозного технічного обслуговування.

**Переваги.** Основні переваги ЦД майже однакові від домену до домену, різниця лише в тому, як його застосовують до проблеми цільового домену. До основні переваги можна винести:

Таблиця 3 – Особливості та проблеми розглянутих галузей ЦД

№	Галузь	Особливості	Виклики
1	Виробництво	Прогнозне обслуговування та моніторинг виробничої лінії; моделювання та перевірка продукту перед виробництвом; підтримка операторів через ЦД обладнання та досвід AR/VR; ЦД як інструмент для інженерного навчання	Обробка великих даних; безпека даних; безпека ЦД; складність системи для багато-профільних і багатоступінчастих виробничих процесів; висока вартість впровадження й розроблення системи
2	Автомобільна	Моделювати поведінку та стан автомобіля у різних середовищах та умовах; моніторинг поточного стану автомобіля та прогнозне обслуговування; покращений досвід продажів із ЦД та AR/VR; індивідуальні функції та виправлення	Оброблення та безпека великих даних; безпека автомобіля у разі перехоплення контролю над ЦД; комунікація – автомобіль може бути оффлайн
3	Медицина	ЦД людини; ЦД органів – вища точність діагностики та прогнозування лікування; прогностичне виявлення хвороби; моделювання біологічних процесів; ЦД для системи управління медичним центром і контролю обладнання	Етичні питання до ЦД людей; конфіденційність медичних даних і складність оброблення через цю конфіденційність; важко змоделювати або зрозуміти деякі біологічні процеси
4	Аерокосмічна галузь	Моделювання місій; авіамоделювання та тестування компонентів перед виробництвом; моніторинг стану повітряного судна; динамічне прийняття рішень за поточним станом апарату	Низька пропусканна здатність і висока затримка для ЦД на землі для зв'язку з літаком; високі вимоги до безпеки – критична система
5	Розумні міста	Здатність досліджувати та моделювати соціальну діяльність для різних ситуацій; модель відкритого міста як інструмент демократії та управління; містобудування та моделювання аварій/катастроф	Розумне місто – гетерогенна система з великою кількістю інтеграцій; величезний обсяг даних та їх складність; конфіденційність громадян
6	Освіта	Покращена доступність; кожен учень може мати свою модель; здатність змоделювати ситуації, які важко знайти в реальності; безпека людей та обладнання	Проблеми з помилковим досвідом навчання (неточна модель), ЦД для навчання ручної діяльності та роботи в команді
7	Будівництво	Моделювання конструкції перед виробництвом; моніторинг на кожному етапі будівництва; розширена точність і нові моделі систем управління будівлею	Складні процеси в будівельній галузі. Вимоги до безпеки та роботи у реальному часі проти точності – важко обробляти високоточні моделі будівель у режимі реального часу
8	Залізничний транспорт	Прогнозне обслуговування та безпека транспорту і залізнодорожних вузлів або полотна. Моделювання трафіку та поведінки людей на станції для скорочення простою та покращення досвіду очікування пасажирів	Велика кількість та щільність критичних компонентів, що повинні бути цифровізовані для повного контролю

– швидке створення прототипів, а також дизайн продукту;

– прогнозування проблем / планування системи – прогнозне обслуговування;

– безпека та зменшення ризиків – допомога передбачити аварії або простої системи;

– підвищує продуктивність і знижує витрати;

– доступність – фізичний пристрій можна контролювати та використовувати віддалено або у віртуальному середовищі;

– зменшення відходів – може допомогти уникнути виробництва непотрібних продуктів, уникнення надмірного використання ресурсів;

– навчання – стає більш доступним, можливим, привабливим та безпечним.

**Виклики.** Проблеми в основному пов'язані зі складністю систем ЦД, точністю моделі та безпекою. Причиною цього є те, що системи ЦД гетерогенні, мультидисциплінарні та включають широкий спектр складних технологій. У цьому випадку проблеми кожної технології актуальні також для ЦД. Їх можна підсумувати таким чином:

– складність – неоднорідні мультидисциплінарні системи включають занадто багато деталей, які важко зрозуміти, а також вимагають висококваліфікованих спеціалістів;

– відсутність стандартизації та інструментів – ЦД все ще активно розвиваються, досі немає чітко визначених протоколів, стандартів, фреймворків, які можуть допомогти побудувати такі системи, та іноді

визначених термінів. Проблема полягає в тому, що навіть деякі ключові технології ЦД, такі як IoT, все ще мають деякі проблеми зі стандартизацією;

– вартість – для використання повного потенціалу необхідно створити складну систему з великими моделями, залучити значні обчислювальні та людські ресурси. Якість ЦД залежить від якості віртуального представлення, і чим більше побудовано систем високої точності, тим більшу це має вартість. Підприємства повинні розуміти, як це може принести їм переваги та зробити інвестиції у ЦД на початку;

– дані – ЦД містять величезну кількість даних, датчики на виробництві, автомобільні компоненти, різні роботи та пристрої, які постійно надсилають дані у хмару до віртуального двійника для подальшого аналізу. Оскільки ЦД є мультидисциплінарними і можуть включати різні технології, надзвичайно важливо добре організувати потоки даних, структури та очистити дані, щоб мати можливість їх ефективно використовувати. Об'єднання даних вважається однією з поширених проблем ЦД;

– безпека та конфіденційність – оскільки велика кількість даних передається з різних джерел, важливо розробити безпечні з'єднання та механізми аутентифікації. Особливо це важливо для конфіденційних даних, таких як датчики медичних пристроїв, компоненти критичних систем, персональні дані;

– дані у реальному часі проти точності – чим точніша модель ЦД, тим ефективніше вона працює.

Але такі точні моделі включають величезну кількість даних, які важко обробляти у реальному часі. Тому часто доводиться шукати компроміс.

Треба додати до загальних проблем те, що кожен домен може мати деякі унікальні виклики. Приклади для деяких доменів було розглянуто вище.

В той же час сучасні дослідження ЦД намагаються вирішити ці завдання, паралельно розширюючи зону їх застосування. Багато рішень активно обговорюються в рамках суміжних напрямків, таких як хмарні обчислення, IoT або аналітика великих даних. Але незважаючи на ці виклики, ЦД вважається однією з провідних технологій у космічному, військовому та виробничому секторах. Ринок ЦД та науковий інтерес до теми постійно зростає. В той же час очікується, що ЦД будуть активно інтегровані в наше життя, не тільки в дослідженнях та виробництві, але й у звичайному житті: як громадяни на вулиці, як пацієнти в медичних центрах, як пасажери у

транспорті, і як клієнти в торгових центрах або онлайн-магазинах.

## 5. Подальші напрямки роботи

В подальшому планується розвивати тему «Методи та технології розроблення цифрових двійників для гарантоздатних систем індустріального інтернету речей». Як зазначалося раніше, виробництво є однією з провідних галузей для ЦД, яка має високі вимоги з точки зору безпеки.

До надійних систем належать надійність, готовність, працездатність, інформаційна та функціональна безпека, живучість. Такі показники можна оцінювати та покращувати за допомогою підходів ЦД по прогнозованому обслуговуванню та моніторингу.

У згаданому напрямку роботи пропонується глибоко дослідити, як ЦД можуть вплинути на цілісність промислової системи, підвищити її безпеку та захист, а також продуктивність.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Jamwal A., Agrawal R., Sharma M., Giallanza A (2021), Industry 4.0 technologies for manufacturing sustainability: a systematic review and future research directions, *Applied Sciences* 2021, 11(12), 5725.
2. da Silva Mendonca R., de Oliveira Lins S., de Bessa I. V., de Carvalho Ayres F. A. Jr., de Medeiros R. L. P., de Lucena V. F. Jr (2022), Digital Twin Applications: A Survey of Recent Advances and Challenges, *Processes* 2022, 10, 744.
3. Concetta Semeraro, Mario Lezoche, Hervé Panetto, Michele Dassisti (2021), Digital twin paradigm: A systematic literature review, *Computers in Industry*, Elsevier, 2021, 130, pp.103469.
4. Why IoT is the Backbone for Digital Twin (2020), available at: <https://www.ptc.com/en/blogs/corporate/iot-digital-twin> (accessed August, 2022).
5. Top 10 Digital Twin Companies Impacting Industry 4.0 Innovations in 2021 (2022), available at: <https://www.emergenresearch.com/blog/top-10-digital-twin-companies-impacting-industry-4-0-innovations-in-2021> (accessed August, 2022).
6. Singh M., Fuenmayor E., Hinchy E. P., Qiao Y., Murray N., Devine D (2021), Digital Twin: Origin to Future, *Applied System Innovation* 2021, 4, 36.
7. Kite-Powell J, Using Digital Twins And Drones To Capture Physical Environments (2021), available at: <https://www.forbes.com/sites/jenniferhicks/2021/12/28/using-digital-twins-and-drones-to-capture-physical-environments/?sh=31ca46e2556e> (accessed August, 2022).
8. Asia/Pacific\* Leads the Shift to Digital-First with 1 in 3 Companies Generating More Than 30% Revenues from Digital Products and Services By 2023, IDC Predicts (2021), Available at: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prAP48347921> (accessed August, 2022).
9. Dozortsev Victor, Digital twins in industry: genesis, composition, terminology, technologies, platforms, prospects. Part 2. Key technologies of digital twins. Types of a physical object modeling (2020). *Automation in Industry*, 2020, No. 11, 3-10.
10. Qian C., Liu X., Ripley C., Qian M., Liang F., Yu W, Digital Twin – Cyber Replica of Physical Things: Architecture, Applications and Future Research Directions (2022), *Future Internet* 2022, 14, 64.
11. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C, Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research (2020), *IEEE Access* 2020, 8, 108952–108971.
12. Singh M., Srivastava R., Fuenmayor E., Kuts V., Qiao Y., Murray N., Devine D (2022), Applications of Digital Twin across Industries: A Review, *Appl. Sci.* 2022, 12, 5727.
13. Botín-Sanabria D.M., Mihaita A.-S., Peimbert-García R.E., Ramírez-Moreno M.A., Ramírez-Mendoza R.A., Lozoya-Santos J.d.J, Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review (2022), *Remote Sensing* 2022, 14, 1335.
14. Autiosalo Juuso, Discovering the Digital Twin Web - From singular applications to a scalable network (2021), available at: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/111416> (accessed August, 2022).
15. Shahriar M. (2020), Towards a Cyber-Physical Manufacturing Cloud through Operable Digital Twins and Virtual Production Lines, available at: <https://scholarworks.uark.edu/etd/3739> (accessed August, 2022).
16. Vyacheslav Kharchenko, Olga Morozova. Digital Twin for Logistics System of the Manufacturing Enterprise Using Industrial IoT (2019), vol. 45, no. 1 (2019): pp-zz.
17. Stojanovic L., Uslander T., Volz F., Weibenbacher C., Muller J., Jacoby M., Bischoff T, Methodology and Tools for Digital Twin Management – The FA3ST Approach (2021), *IoT* 2021, 2, 717–740.
18. He F., Ong S. K., Nee A. Y. C, An Integrated Mobile Augmented Reality Digital Twin Monitoring System (2021), *Computers* 2021, 10, 99.
19. Kampczyk A., Dybel K, The Fundamental Approach of the Digital Twin Application in Railway Turnouts with Innovative Monitoring of Weather Conditions (2021), *Sensors* 2021, 21, 5757.
20. Z. Lv D. Chen and M. S. Hossain, Traffic Safety Detection System by Digital Twins and Virtual Reality Technology (2022), *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2022, pp. 1-6.
21. Hazal Şimşek, Top 5 Use Cases of Digital Twin in Automotive Industry in 2022 (2022), available at: <https://research.aimultiple.com/digital-twin-automotive/> (accessed August, 2022).



22. Hazal Şimşek, Best Digital Twin Applications & Use Cases in Healthcare in 2022 (2022), available at: <https://research.aimultiple.com/digital-twin-healthcare/> (accessed August, 2022),
23. Y. Liu et al., A Novel Cloud-Based Framework for the Elderly Healthcare Services Using Digital Twin (2019), in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 49088-49101, 2019.
24. Cory Kays & team (Aurora Flight Sciences), David Knezevic & Phuong Huynh (Akselos), Michael Kapteyn (MIT PhD student), Jacob Pretorius (Jessara Group), Development of a Predictive Digital Twin (2021), available at: <https://kiwi.oden.utexas.edu/research/digital-twin> (accessed August, 2022).
25. Shaun Waterman, Air Force Goes All in on Digital Twinning—for Bombs As Well As Planes (2021), available at: <https://www.airforcemag.com/air-force-goes-all-in-on-digital-twinning-for-bombs-as-well-as-planes/> (accessed August, 2022).
26. Schrotter G., Hürzeler C, The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning (2020), PFG 88, 99–112 (2020).
27. Tianhu Deng, Keren Zhang, Zuo-Jun (Max) Shen, A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities, *Journal of Management Science and Engineering* (2021), Volume 6, Issue 2, 2021, Pages 125-134, ISSN 2096-2320.
28. David N. Ford, Charles M. Wolf, Smart Cities with Digital Twin Systems for Disaster Management (2020), *Journal of Management in Engineering* Vol. 36, Issue 4 (July 2020).
29. Shahat Ehab, Chang T. Hyun, Chunho Yeom, City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda (2021), *Sustainability* 13, no. 6: 3386.
30. Joe David, development of a digital twin of a flexible manufacturing system for assisted learning (2018), Available at: [https://www.researchgate.net/publication/335234337\\_Development\\_of\\_a\\_digital\\_twin\\_of\\_a\\_flexible\\_manufacturing\\_system\\_for\\_assisted\\_learning](https://www.researchgate.net/publication/335234337_Development_of_a_digital_twin_of_a_flexible_manufacturing_system_for_assisted_learning) (accessed August, 2022).
31. Christian Stary, Claudia Kaar, Sabrina Oppl, Dominik Schuhmann, Johannes Kepler University Linz, Tangibles and Digital Twins: Toward Meaningful Learning Support in CyberPhysical System Development (2022), ISBN: 978-1-912532-28-5.
32. Yitmen I., Alizadehsalehi S., Akner I., Akner M. E, An Adapted Model of Cognitive Digital Twins for Building Lifecycle Management (2021), *Applied Sciences* 2021, 11, 4276.
33. Salem T., Dragomir M, Options for and Challenges of Employing Digital Twins in Construction Management (2022), *Applied Sciences* 2022, 12, 2928.
34. What is industry 4.0? (2016), available at: <http://www.industrial-union.org/industry-40-the-industrial-revolution-happening-now/> (accessed August, 2022).
35. Ahleroff S., Xu X., Zhong R. Y., Lu Y, Digital Twin as a Service (DTaaS) in Industry 4.0: An Architecture Reference Model (2021), *Advanced Engineering Informatics* 2021, 47(2), 101225.
36. Padovano A., Longo F., Nicoletti L., Mirabelli G, A Digital Twin based Service Oriented Application for a 4.0 Knowledge Navigation in the Smart Factory (2018), *IFAC-PapersOnLine* 2018, 51(11), 631–636.
37. Al-Ali A. R., Gupta R., Batool T. Z., Landolsi T., Aloul F., Al Nabulsi A, Digital Twin Conceptual Model within the Context of Internet of Things (2020), *Future Internet* 2020, 12, 163.
38. Start Innovating with Digital Twins Technology, Available at: <https://www.perforce.com/p/resources/vcs/digital-twins-technology> (accessed August, 2022).
39. Hou Lei, Shaoze Wu, Guomin Zhang, Yongtao Tan, and Xiangyu Wang, Literature Review of Digital Twins Applications in Construction Workforce Safety (2020), *Applied Sciences* 11, no. 1: 339.
40. Kaewunruen Sakdirat, Sresakoolchai Jessada, Lin Yi-hsuan, Digital twins for managing railway maintenance and resilience (2021), *Open Research Europe*. 1. 91. 10.12688/openreseurope.13806.1.
41. Dirnfeld Ruth, Digital Twins in Railways (2022), 10.13140/RG.2.2.32690.68804.
42. Kampczyk Arkadiusz, Dybel Katarzyna, The Fundamental Approach of the Digital Twin Application in Railway Turnouts with Innovative Monitoring of Weather Conditions (2021), *Sensors*. 21(17). 5757. 10.3390/s21175757.
43. Katharina Rombach, Towards a Data-driven Operational Digital Twin for Railway Wheels (2022) available at: <https://youtu.be/5igWA9wuDdw> (accessed August, 2022).

Received (Надійшла) 04.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.11.2022

### Methods and technologies for the development of digital twins for guarantee-capable systems of the industrial Internet of Things

V. Shcheglov, O. Morozova

**Abstract.** With the development of industries through industrial revolution 4.0, active digitization of aspects of life from transport to commerce, the availability of technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence and cloud computing, there is a growing demand for Digital Twins (DT), that can improve safety and reduce costs by collecting data, their analysis on models of real objects to make effective decisions in real time. The purpose of this article is to review the concept of DT, analyze the key domains together with examples of their use, features, problems, limitations, and benefits, and formalize common problems and limitations in DT. The paper reviewed the concept of DTs, which help in making decisions in real time to increase the efficiency of work, as well as to mitigate or prevent unexpected events during the life cycle of a real object. There are three main modeling approaches: fundamental modeling, data-driven modeling, and hybrid modeling. Another view of DT is the use of hierarchy - duplicates of components, assets, systems and processes. DTs can represent simple sensors and pumps, or DTs can be like systems and combine and model several production subsystems. The concept of DT can be applied to almost all fields of activity, but this article examines the most common industries that can be considered the main ones or that have influenced the development of Digital Twins. The analysis of key industries for the use of DT was carried out, the features and problems of application in each of the considered domains were determined. It was formulated what are the common challenges, advantages and features of digital twins.

**Keywords:** digital twins, digital twin industries, industry 4.0, IoT, predictive maintenance.

Н. Б. Бурдейна, Я. І. Бірук

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

## ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РІДИННИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ШИРОКОГО ЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ

**Анотація.** Нормативно-правові європейські та національні вимоги формують низку питань, пов'язаних із одночасним забезпеченням електромагнітної безпеки людей у виробничих і побутових умовах, а також електромагнітної сумісності електричного та електронного обладнання. Проведено дослідження з розроблення і впровадження ефективних захисних матеріалів від впливу електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Запропоновано методологічний підхід для виготовлення рідких композицій для екранування електромагнітних полів промислової частоти, дуже високих та ультрависоких частот. Для проведення досліджень матрицею як носієм наповнювача обрано водно-дисперсійну фарбу. У якості наповнювачів застосовувалися концентрат залізної руди з переважним (до 75–80 %) вмістом магнетиту та ливарний лускатий графіт. Визначення захисних властивостей експериментальних зразків здійснювалися через встановлення залежності коефіцієнтів екранування електричного поля промислової частоти, магнітного поля промислової частоти та електромагнітного поля ультрависокої частоти від вагового вмісту наповнювача. Вимірювання напруженостей електричного та магнітного поля виконувалися каліброваним приладом ПЗ-50. Вимірювання щільності потоку енергії електромагнітного поля ультрависокої частоти здійснювалися каліброваним приладом ПЗ-31. Вимірювання коефіцієнтів екранування здійснювалося з використанням замкнених екранів, усередину яких крізь технологічний отвір вміщувалася вимірювальна антена. Знаходження прийнятних співвідношень електрофізичних та магнітних властивостей складових композиту обумовлює необхідність попереднього розрахункового оцінювання властивостей для отримання потрібних коефіцієнтів екранування. Найбільш придатними для частинок магнетиту у залізородному концентраті є співвідношення Лорентца та співвідношення Максвелла-Гарнета. Для графіту доцільно скористатися формулою Оделевського. Показано, що дані композити на рідинній основі мають ряд переваг через їх відносну простоту виготовлення та зручність нанесення на поверхні великих площ та складних конфігурацій, а також регульованість коефіцієнтів поглинання та відбиття за рахунок фізико-хімічного складу та технологій виготовлення. Застосування композиційних рідинних матеріалів дозволяє вирішувати задачі забезпечення електромагнітної безпеки, електромагнітної сумісності і є доцільним з технічних та економічних міркувань.

**Ключові слова:** композиційні рідинні матеріали, екранування, електромагнітні поля.

### Вступ

Імплементация вимог європейської директиви з електромагнітної безпеки [1] до нормативно-правової бази України породжує низку проблем, пов'язаних із забезпеченням електромагнітної безпеки людей у виробничих та побутових умовах. Значна частина вимог загальноєвропейських стандартів і санітарних норм жорсткіша за національні, тому національні норми засобів і заходів захисту від електромагнітних впливів потребують перегляду. Крім захисту людей актуальною задачею є одночасне забезпечення електромагнітної сумісності електричного та електронного обладнання. Європейські нормативи щодо електромагнітної сумісності, наприклад, [2] вже прийняті в Україні методом підтвердження. Одночасно мають вирішуватися задачі підвищення електромагнітної безпеки та електромагнітної сумісності, тому потребує розроблення і впровадження комплекс заходів зі зниження рівнів електромагнітних полів у приміщеннях та будівлях в цілому. Вагомою складовою такого комплексу є розроблення ефективних матеріалів для екранування електромагнітних полів. Традиційні металеві екрануючі конструкції не відповідають вимогам сьогодення, тому головним їх недоліком є великі коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль. Це є небажаним в умовах високої

інтенсивності електромагнітних випромінювань дуже високих та ультрависоких частот, гранично допустимий рівень яких становить  $100 \text{ мкВт/см}^2$ . Найбільш прийнятними є композиційні захисні матеріали, для яких коефіцієнти поглинання та відбиття можуть бути регульованими за рахунок фізико-хімічного складу та технологій виготовлення. Переважна більшість існуючих композитів призначена для захисту від впливу електромагнітних полів одного частотного діапазону або певної частотної смуги. В той же час у сучасних будівлях і спорудах спостерігається підвищений електромагнітний фон як електромагнітних полів наднизьких частот (в основному промислової частоти та її гармонік і інтергармонік), так і електромагнітних полів надвисоких та вищих частот. Отже, актуальною задачею є розроблення і впровадження ефективних захисних матеріалів від впливу електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Перевагами захисних композитів на рідинній основі є відносна простота виготовлення та зручність нанесення на поверхні великих площ та складних конфігурацій. Тому підвищення ефективності рідинних матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону є перспективним напрямом забезпечення електромагнітної безпеки, електромагнітної сумісності і є доцільним з технічних та економічних міркувань.

**Огляд літературних джерел.** На сьогоднішній день питанням розроблення композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів приділяється багато уваги. У роботі [3] показано результати розроблення і дослідження захисних властивостей металополімерних матеріалів на основі феритів з додаванням дрібнодисперсного алюмінію. Ці матеріали мають достатню загальну ефективність через значні коефіцієнти відбиття, зумовлені великим вмістом алюмінію. Нанокompatитні матеріали мають значно нижчі коефіцієнти відбиття [4], але використання наповнювача нанорозмірів, з достатніми концентраціями, збільшує вартість кінцевого продукту і робить його непридатним для покриття поверхонь великих площ, таких як стелі, стіни тощо.

Матеріали з прийнятною вартістю у більшості мають ефективність в одному частотному діапазоні, в основному – мікрохвильовому [5]. Загальним недоліком більшості металополімерних композицій є велика товщина і жорсткість, що знижує технологічність їх застосування для покриття конструкцій складних конфігурацій і обумовлює велику кількість відходів.

Найбільш прийнятними, щодо практичного застосування, є рідкі композиційні захисні матеріали [6, 7]. Але у роботі [6] обґрунтовано застосування поряд із графітом, графітизованої сажі, яка не зважаючи на велику вартість, робить матеріал придатним для екранування електромагнітного поля локальних джерел. Ефективність матеріалу у широкому діапазоні частот для дуже високих і вищих частот відносна [7], оскільки значний внесок у електромагнітну обстановку дають електричні та магнітні поля наднизьких та низьких частот.

У роботі [8] показано, що матеріали на основі певних серійних лакофарбових матеріалів мають прийнятні адгезію і когезію навіть за значного вагового вмісту (до 40–50 %) металеві субстанції.

У дослідженні [9] наведено результати випробувань матеріалів на основі поширених фарб з наповнювачем із магнетиту. За достатньої ефективності екранування магнітної та електричної складових електромагнітного поля промислової частоти та її гармонік, коефіцієнти екранування електромагнітних полів ультрависоких частот недостатні. Це обумовлене постійним підвищенням робочих частот усіх засобів бездротового зв'язку. Тому доцільно розробити і дослідити захисні властивості рідких екрануючих сумішей з прийнятними коефіцієнтами екранування в усіх діапазонах частот та критичних частотних смугах.

**Метою роботи** є розроблення концептуальних засад підвищення ефективності та регульованості властивостей композиційних рідких матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону.

### Викладення основного матеріалу

Для проведення досліджень матрицею як носієм наповнювача обрано водно-дисперсійну фарбу. У попередній роботі [9] застосування було отримано найгірший результат, але такі фарби дуже поширені, зручні у використанні та мають низьку вартість. У якості

наповнювачів застосовувалися концентрат залізної руди з переважним (до 75–80 %) вмістом магнетиту та ливарний лускатий графіт, який у достатніх кількостях виробляється в Україні. Визначення захисних властивостей матеріалів у діапазоні наднизьких частот здійснювалися за електричної та магнітної складових електромагнітного поля промислової частоти 50 Гц.

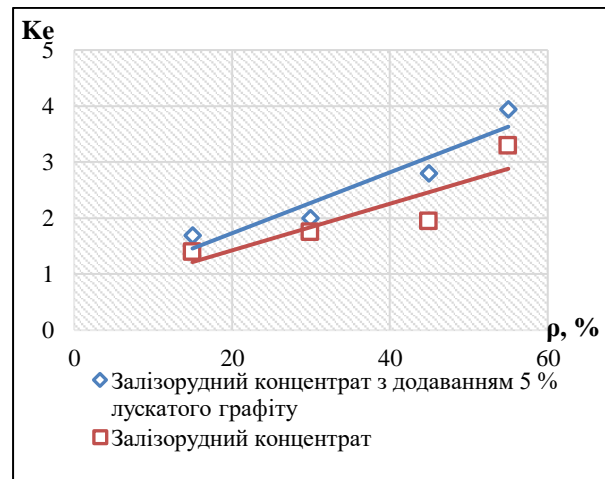
Вимірювання виконувалися каліброваним вимірювачем напруженостей електричного та магнітного поля ПЗ-50. Основна похибка вимірювань не перевищувала 1 дБ. Вимірювання щільності потоку енергії електромагнітного поля ультрависокої частоти здійснювалися на частоті 2,45 ГГц з використанням каліброваного приладу ПЗ-31. Максимальна основна похибка вимірювань не перевищувала 2,7 дБ.

Вимірювання коефіцієнтів екранування здійснювалося з використанням замкнених екранів розмірами (0,2×0,2×0,2) м, усередину яких крізь технологічний отвір вміщувалася вимірювальна антена. Товщина захисного шару складала 60–70 мкм.

Коефіцієнтом екранування вважається відношення напруженості поля (або щільності потоку енергії) перед екраном до напруженості поля у захищеній зоні.

Було послідовно виміряно зміну напруженостей електричної, магнітної складових електромагнітного поля промислової частоти та щільності потоку енергії внаслідок її екранування.

Результати екранування електричної складової електромагнітного поля промислової частоти від вагового вмісту наповнювача наведено на рис. 1.



**Рис. 1.** Залежність коефіцієнтів екранування електричного поля промислової частоти ( $K_e$ ) від вагового вмісту наповнювача ( $\rho$ , %)

Аналогічні вимірювання було проведено щодо магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти, рис. 2.

Результати екранування електромагнітного поля частотою 2,45 ГГц наведено на рис. 3.

Аналіз результатів, представлених на рис. 1–3, свідчить, що додавання навіть невеликої кількості лускатого графіту значно підвищує коефіцієнти екранування низькочастотного електричного та високочастотного електромагнітного полів.

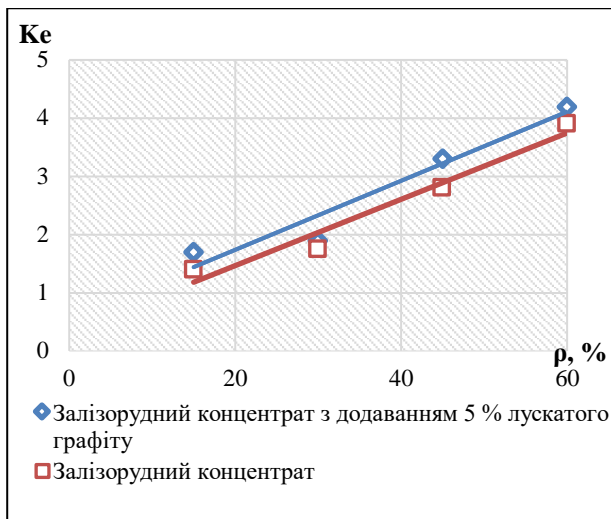


Рис. 2. Залежність коефіцієнтів екранування магнітного поля промислової частоти ( $K_e$ ) від вагового вмісту наповнювача ( $\rho$ , %)

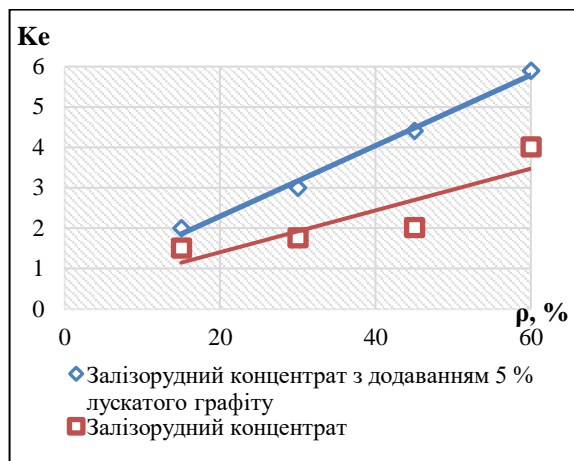


Рис. 3. Залежність коефіцієнтів екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти ( $K_e$ ) від вагового вмісту наповнювача ( $\rho$ , %)

Вочевидь, це пов'язано з підвищенням провідності матеріалу (питома провідність даного графіту –  $1,0 \cdot 10^{-2}$  –  $2,0 \cdot 10^{-2}$  См/м), а основного наповнювача – магнетиту – порядку  $10^{-4}$  См/м. При цьому вплив графіту на напруженості магнітного поля практично відсутній, оскільки цей параметр обумовлений виключно магнітними властивостями компонентів матеріалу. В цілому отримані результати можна пояснити з точки зору фундаментальних положень електродинаміки суцільних середовищ.

Необхідність пошуку балансу електрофізичних та магнітних властивостей складових композиту для раціоналізації коефіцієнтів екранування полів найбільш критичних частот та частотних смуг обумовлює необхідність попереднього розрахункового оцінювання властивостей для отримання потрібних коефіцієнтів екранування. Найбільш придатними для цього є співвідношення Лоренца:

$$\mu = 1 + \frac{\nu_m(\mu_m - 1)}{1 + \frac{1 - \nu_m}{3}(\mu_m - 1)},$$

де  $\mu$  – ефективна магнітна проникність магнітодіелектрика,  $\mu_m$  – магнітна проникність наповнювача,  $\nu_m$  – об'ємний вміст наповнювача у матеріалі. Та співвідношення Максвелла-Гарнета:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_d}{\varepsilon + 2\varepsilon_d} = \nu_m \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_d}{\varepsilon_m + 2\varepsilon_d},$$

$\varepsilon_d$ ,  $\varepsilon_m$  – діелектричні проникності матриці та наповнювача,  $\nu_m$  – об'ємна доля наповнювача у діелектричній матриці. Але у цих співвідношеннях частинки наповнювача вважаються умовно сферичними.

Якщо для частинок магнетиту у залізорудному концентраті сферичне наближення прийнятне, то для графіту виникають труднощі через видовжену форму окремих частинок. У цьому випадку доцільно скористатися формулою Оделевського:

$$\varepsilon = \varepsilon_d \left[ 1 + \frac{\nu_m(\varepsilon_m - \varepsilon_d)}{(1 - \nu_m/\nu_k) \cdot F \cdot (\varepsilon_m - \varepsilon_d) + \varepsilon_d} \right],$$

де  $\varepsilon_d$ ,  $\varepsilon_m$  – діелектричні проникності матриці та наповнювача,  $\nu_m$  – об'ємний вміст наповнювача,  $\nu_k$  – критичний об'ємний вміст наповнювача, за якого екрануючі частинки контактують між собою,  $F$  – коефіцієнт деполіризації:

$$F = \ln(2l/d) / (l/d)^2,$$

де  $l$ ,  $d$  – середні довжина частинки та діаметр.

$$\nu_k = \frac{[3F(1-F)]^{0,6}}{[4F\sqrt{l/d} + (1+F)/\sqrt{l/d}]^{0,6}}.$$

Застосування таких розрахунків свідчить, що вони дають прийнятні орієнтири щодо складу композиційних матеріалів для отримання потрібних кінцевих параметрів.

Наведені експериментальні дані щодо коефіцієнтів екранування значно нижчі порівняно з розробками [6, 7], де отримані коефіцієнти екранування до 20 дБ і вище ( $K_e = 100$ ). Але досвід інструментального моніторингу електромагнітної обстановки свідчить, що перевищення гранично допустимих рівнів практично ніколи не буває більшим за 2–3 рази. Тобто, забезпечення коефіцієнтів екранування на рівні 10–12 враховує навіть вимоги принципу ALARA (As Low As Reasonably Achievable), тобто зниження рівнів полів до розумно досяжних. В той же час використані матеріали на порядок дешевші за аналоги, а кінцевий продукт має прийнятні властивості.

Описаний підхід, випробований на модельних матеріалах, може бути використаний для розроблення промислових технологій вироблення рідких захисних матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону у виробничих та побутових умовах.

## Висновки

1. Запропоновано методологічний підхід для виготовлення рідких композицій для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Він полягає у додаванні до металополімеру з

магнітним наповнювачем (магнетиту) лускатого графіту у малих концентраціях.

2. Додавання до суміші лускатого графіту з ваговим вмістом залізородного концентрату 15–60 % у кількості 5 % підвищує коефіцієнти екранування електричного поля промислової частоти на 0,5–1,0, а електромагнітного поля ультрависокої частоти на 1,0–2,0.

3. Для прогнозування складу композиційних рідинних матеріалів і отримання потрібних коефіцієнтів екранування доцільно застосовувати співвідно-

шення Лорентца, Максвелла-Гарнета та Оделевського. Обов'язковим є обрахування коефіцієнтів деполаризації частинок наповнювача, що підвищує точність кінцевих даних.

4. Отримані результати потребують подальшого уточнення з метою розроблення промислових технологій вироблення рідких захисних композицій з матеріалів низької вартості і кінцевого продукту, призначеного для нанесення на поверхні великих площ та складних конфігурацій.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents. Official Journal of the European Union, 2013. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj> (дата звернення: 30.08.2019).
2. 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: 30.08.2019).
3. Patil, N., Velhal, N. B., Pawar, R., Puri, V. (2015). Electric, magnetic and high frequency properties of screen printed ferrite-ferroelectric composite thick films on alumina substrate. *Microelectronics International*, 32 (1), 25–31. doi: <https://doi.org/10.1108/mi-12-2013-0080>
4. Mondal, S., Ganguly, S., Das, P., Khastgir, D., Das, N. C. (2017). Low percolation threshold and electromagnetic shielding effectiveness of nano-structured carbon based ethylene methyl acrylate nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 119, 41–56. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.022>
5. Беляев, А. А., Беспалова, Е. Е., Лепешкин, В. В. (2015). Радиопо-глощающие материалы на основе отделочных строительных материалов для защиты от СВЧ излучения базовых станций сотовой связи. *Труды ВИАМ*, 6, 80–88.
6. Barsukov, V., Senyk, I., Kryukova, O., Butenko, O. (2018). Composite Carbon-Polymer Materials for Electromagnetic Radiation Shielding. *Materials Today: Proceedings*, 5 (8), 15909–15914. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.063>
7. Senyk, I. V., Kuryptya, Y. A., Barsukov, V. Z., Butenko, O. O., Khomenko, V. G. (2020). Development and Application of Thin Wide-Band Screen-ing Composite Materials. *Physics and Chemistry of Solid State*, 21 (4), 771–778. doi: <https://doi.org/10.15330/pcss.21.4.771-778>
8. Guzii, S., Kryvenko, P., Guzii, O., Yushkevich, S. (2019). Determining the effect of the composition of an aluminosilicate binder on the rheotechnological properties of adhesives for wood. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (6 (102)), 30–38. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185728>
9. Glyva, V., Bakharev, V., Kasatkina, N., Levchenko, O., Levchenko, L., Burdeina, N., Guzii, S., Panova, O., Tykhenko, O., & Biruk, Y. (2021). Design of liquid composite materials for shielding electromagnetic fields. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(6 (111)), 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231479>

Received (Надійшла) 18.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.11.2022

#### Means of increasing the efficiency of liquid materials for shielding electromagnetic fields of a wide frequency range

N. Burdeina, Y. Biruk

**Abstract.** Regulatory and legal European and national requirements form a number of issues related to the simultaneous provision of electromagnetic safety of people in industrial and domestic conditions, as well as electromagnetic compatibility of electrical and electronic equipment. A study was conducted on the development and implementation of effective protective materials against the influence of electromagnetic fields of a wide frequency range. A methodological approach is proposed for the production of liquid compositions for shielding electromagnetic fields of industrial frequency, very high and ultrahigh frequencies. A water-dispersion paint was chosen for conducting research with a matrix as a filler carrier. Iron ore concentrate with a predominant (up to 75–80%) content of magnetite and foundry flake graphite were used as fillers. Determination of the protective properties of the experimental samples was carried out by establishing the dependence of the shielding coefficients of the industrial frequency electric field, industrial frequency magnetic field and ultra-high frequency electromagnetic field on the weight content of the filler. Measurements of electric and magnetic field strengths were performed with a calibrated PZ-50 device. The energy flow density of the ultra-high frequency electromagnetic field was measured using a calibrated PZ-31 device. Measurement of shielding coefficients was carried out using closed screens, inside which a measuring antenna was placed through a technological hole. Finding acceptable ratios of electrophysical and magnetic properties of the components of the composite determines the need for a preliminary calculated assessment of the properties to obtain the required shielding coefficients. The most suitable for magnetite particles in iron ore concentrate are Lorentz and Maxwell-Garnett relations. For graphite, it is advisable to use Odelevsky's formula. It is shown that these liquid-based composites have a number of advantages due to their relative ease of manufacture and convenience of application on the surface of large areas and complex configurations, as well as the adjustability of absorption and reflection coefficients due to the physicochemical composition and manufacturing technologies. The use of composite liquid materials allows solving the problems of ensuring electromagnetic safety, electromagnetic compatibility and is expedient for technical and economic reasons.

**Keywords:** composite liquid materials, shielding, electromagnetic fields.

В. А. Глива<sup>1</sup>, О. В. Землянська<sup>2</sup>, О. С. Ільчук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет України "КПІ імені Ігоря Сікорського" Київ, Україна

## МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ЗАХИСТУ ПРАЦЮЮЧИХ В УМОВАХ ПОЗАРЕГЛАМЕНТНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ ВПЛИВІВ

**Анотація.** Захист працюючих в умовах позарегламентних (екстремальних) температур (низьких та високих) вимагає наявності ефективних захисних матеріалів та одягу з них. Для раціоналізації термозахисту доцільне попереднє оцінювання його ефективності за тих чи інших умов, що можливо здійснити розрахунковими методами. Для цього використане базове рівняння теплопровідності у одномірному вигляді. За наявності даних про товщини, питомі теплоємності, густини та коефіцієнти теплопровідності біологічних тканин (шкіри, кістки) можливе розрахування потрібної ефективності та параметрів матеріалу захисного шару. Для цього надано метод розрахунку коефіцієнтів теплопровідності кожного з шарів, крізь які відбувається теплоперенесення. Для числового розв'язання моделюючого рівняння використано явну різницеву схему. Отримані залежності надають значення коефіцієнтів теплопровідності на межах шарів з різними теплофізичними параметрами. Кількість вузлів за обраною віссю та крок сітки обирається у кожному конкретному випадку, виходячи з потрібної точності розрахунку. Враховуючи можливі розбіжності у значеннях сталих та коефіцієнтів, а також неоднозначність зовнішніх атмосферних впливів у розрахунки необхідно закладати певний запас ефективності захисту.

**Ключові слова:** температурний вплив, теплопровідність, захист, коефіцієнт теплопровідності.

### Вступ

Температурний режим є важливим показником стану виробничого середовища. Як низькі, так і високі (екстремальні) температури негативно впливають на стан здоров'я, працездатність та розумову діяльність людини. Тому забезпечення належного теплового захисту працюючих є актуальною практичною задачею. Зокрема, вимоги щодо захисту персоналу від впливу низьких температур регламентується міжнародним стандартом ISO 15743 [1]. Забезпечення належного термозахисту є багатоплановою задачею. Крім обрання матеріалів достатньої (мінімальної) теплопровідності необхідно враховувати конкретні умови теплопередачі – градієнт температури, вологість повітря за даної температури тощо. Тому доцільно розглянути можливість простого розрахунку потрібного термозахисту. При цьому слід враховувати, що процеси теплопередачі обертові, тобто захисти людини від впливів низьких та високих температур принципово не відрізняються. Головну роль відіграють напрямки передачі теплової енергії. Це надає можливість сформулювати простий у використанні та прийнятний за похибкою математичний апарат з розрахунку потрібних параметрів елементів термозахисту.

**Огляд літературних джерел.** Більшість досліджень з регулювання теплового режиму людини стосуються захисту працюючих від впливу високих температур [2, 3]. Наведені у цих роботах моделі застосовують одномірне нестационарне рівняння теплопровідності. При цьому вважається, що теплоємності і теплопровідності є сталими величинами, що не завжди коректно. У роботі [4] досліджується вплив низьких температур на організм людини за великих експозицій, але не надано рекомендацій щодо нормалізації теплового стану. Оглядове дослідження [5] стосується температурної комфортності середовища з огляду на стать працюючого. У ґрунтовній роботі [6] розглянуто проблематику визначення комфортності середовища з точки зору процесів метаболізму.

Зокрема, розраховані прогнозовані коефіцієнти незадоволення (PPD), усереднені показники незадоволення умовами перебування (PMV) та їх зв'язок зі швидкістю метаболізму у спокої (RMR). Показано відмінності RMC для чоловіків і жінок. Але наведені дані отримані з емпіричних співвідношень і заздалегідь частково суб'єктивні. Тому доцільно, принаймні для працюючих у екстремальних (позарегламентних) умовах, розробити простий розрахунковий метод оцінювання потрібного термозахисту.

**Мета роботи** – розробити методологію розрахунку параметрів матеріалів, необхідних для захисту працюючих в умовах позарегламентних температурних впливів.

### Викладення основного матеріалу

У загальному випадку рівняння теплопровідності у тілі за відсутності внутрішніх джерел тепла таке:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

Характер взаємодії тіла з оточуючим середовищем описується умовою:

$$a(t_1 - t_2) = -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0}, \quad (2)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності стінки,  $\frac{\partial t}{\partial n}$  – температурний градієнт у стінці,  $a$  – коефіцієнт теплопровідності.

Приводячи рівняння (1) за стандартною процедурою до безрозмірного вигляду, можна дійти висновку, що безрозмірна температура залежить від (у даному випадку – товщина).

Аналіз рівняння (2), яке визначає умови теплообміну на межі розділу, методами теорії подібності свідчить, що подібність процесу теплообміну на межі тіла визначається критерієм Біо.

$$B_i = al/\lambda,$$

тобто, за конкретної форми тіла температурні поля  $\theta = f(x, y, z)$  будуть подібні, а температурне поле за нестационарної теплопровідності визначається узагальненим виразом:

$$\theta = f(F_0, B_i, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}),$$

де  $\bar{x} = x/l$ ,  $\bar{y} = y/l$ ,  $\bar{z} = z/l$ .

За настання у тілі регулярного режиму теплообміну, зміни температури за усією поверхнею стають однаковими для усіх точок. За будь-яких умов певні ділянки (частини) тіла можна вважати такими, що мають у кожний момент часу однакові температури. Рівномірність температурного поля підвищується зі зростанням коефіцієнта теплопровідності тіла і зі зниженням його коефіцієнта теплообміну з оточуючим середовищем. За  $B_i < 0,1$  з достатньою для практичного застосування похибкою температурне поле можна вважати рівномірним.

Для тіла об'ємом  $V$  і поверхнею контакту з зовнішнім середовищем  $S$  з рівномірним температурним полем визначено тепловий баланс за час  $d\tau$ . Надлишкова температура буде однаковою для усіх точок тіла. При цьому за  $d\tau > 0$  завжди  $d\theta < 0$ . За відсутності внутрішніх (або зовнішніх, у залежності від напрямку процесу) джерел тепла  $it_2 = \text{const}$  (2):

$$-V\rho C d\theta = a\theta S d\tau.$$

Записавши його у вигляді:  $\frac{d\theta}{\theta} = -m d\tau$ , де  $m$  ви-

значається як  $m = \frac{Sa}{V\rho C}$ , отримуємо:  $\ln \theta = -m\tau + C_i$ ,

що можна покласти у розрахунок теплового режиму тіла. Константа інтегрування  $C_i$  визначається з початкових умов у конкретних випадках. Коефіцієнт пропорційності  $m$  характеризує швидкість охолодження (або нагрівання). Вважаючи, що за  $\tau=0$

$$\theta = \theta', \quad C = \ln \theta', \quad C = \ln \theta', \quad \ln \theta = -m\tau.$$

Це співвідношення можна використовувати у практичних розрахунках для тіл будь-якої форми для  $B_i < 0,1$ . Безрозмірна надлишкова температура визначається як  $\bar{\theta} = \theta/\theta'$ .

У нерівномірному температурному полі закономірності охолодження та нагрівання мають таку ж форму, як і у рівномірному температурному полі, а особливості процесу враховуються величиною швидкості охолодження  $m$ . Якщо у будь-якій точці тіла, у якому встановився регулярний режим теплообміну, за час  $\tau$  з моменту початку процесу надлишкова температура дорівнює  $\theta_1$ , а за час  $\tau_2$  вона набула значення  $\theta_2$ , то

$$\ln \theta_1 = -m\tau_1 + C_i, \quad \ln \theta_2 = -m\tau_2 + C_i, \quad \ln \frac{\theta_2}{\theta_1} = -m\Delta\tau.$$

У більшості реальних процесів, пов'язаних з теплообміном людини з оточуючим простором, задача одновимірна.

Наприклад, для дослідження процесу охолодження голови використовується наступне рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = (a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}), \quad (3)$$

де  $T$  – температура;  $a_x$  – коефіцієнт температуропровідності;  $t$  – час.

Відзначимо, що в моделі приймається, що область дослідження складається з різних шарів, а саме, шкіра та кістка черепа людини, що відрізняються теплофізичними властивостями.

Розрахункова схема показана на рис. 1.

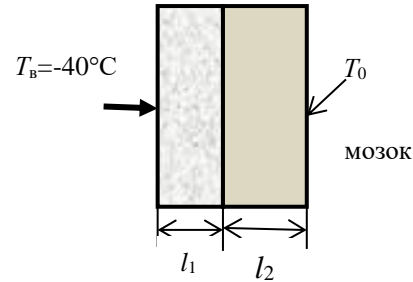


Рис. 1. Розрахункова схема шарів голови

Таким чином, фізична модель складається з двох шарів. Перший шар шкіри має такі фізичні параметри:

товщина шару  $l_1 = 3,2$  мм;

питома теплоємність  $C_1 = 3350$  Дж/(кг\*К)

густина  $\rho_1 = 1056$  кг/м<sup>3</sup>;

коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_1 = 0,48$  Вт/(м\*К).

Коефіцієнт температуропровідності для першого шару розраховується так:

$$a_1 = \frac{\lambda_1}{\rho_1 \cdot C_1}.$$

Другий шар кістка черепа має такі фізичні параметри:

товщина шару  $l_2 = 4,5$  мм;

теплоємність  $C_2 = 1300$  Дж/(кг\*К);

густина  $\rho_2 = 1850$  кг/м<sup>3</sup>;

коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_2 = 0,53$  Вт/(м\*К).

Коефіцієнт температуропровідності для другого шару розраховується так:

$$a_2 = \frac{\lambda_2}{\rho_2 \cdot C_2}.$$

Для моделюючого рівняння теплопровідності (3) ставляться такі граничні умови (рис. 1):

- на лівій межі (зі сторони навколишнього середовища) задається значення температури  $T = -40$  °С;

- на правій межі (всередині голови) задається значення температури  $T_0 = 36,6$  °С.

При проведенні розрахунків гранична умова з часом має вигляд:

$$T_{n-1} = T_n,$$

де  $T_n$  – це температура в останній розрахунковій клітинці;  $T_{n-1}$  – температура в попередній розрахунковій

комірці. Початкова умова при  $t=0$  в усій розрахунковій області приймається  $T=36.6$  °C.

Для проведення розрахунків використовується прямокутна різницева сітка. Значення температури визначається в центрах різницевих комірок. Для числового розв'язання моделюючого рівняння (3) використовується явна різницева схема [7].

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \Delta t \cdot a_1 \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x^2} + \Delta t \cdot a_2 \frac{-T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2}, \quad (3)$$

$$\text{де} \quad a_1 = \frac{2(a_{i+1} \cdot a_i)}{a_{i+1} + a_i}, \quad (4)$$

$$a_2 = \frac{2(a_{i-1} \cdot a_i)}{a_{i-1} + a_i}. \quad (5)$$

Залежності (4) та (5) використовуються для розрахунку значення коефіцієнта теплопровідності на межі шарів з різними теплофізичними параметрами. Кількість вузлів за віссю  $Ox$  та крок сітки обирається у кожному конкретному випадку, виходячи з необхідної точності прорахунку.

Перевагою такого підходу є можливість точного визначення потрібного теплозахисту, першого шару для отримання нормативних значень температури голови працівника.

Наявність даних про температуру зовнішнього повітря не завжди дає повне уявлення про калориметричні процеси у захисному шарі. Значний вплив на

процес теплопередачі може складати швидкість вітру, вологість повітря, від якої залежить його питома теплоємність.

Тому у розрахунках щодо захисту працюючих від температурних впливів необхідно закладати певний запас ефективності засобів захисту.

### Висновки

1. Для підвищення рівня захисту працюючих в умовах позарегламентних температурних впливів доцільне попереднє оцінювання ефективності засобів захисту. Це можливо за рахунок застосування розрахунків щодо визначення значень коефіцієнтів теплопровідності.

2. Розрахунки теплопровідності виконуються, виходячи з рівняння теплопровідності у одномірному вигляді. Для зниження похибки розрахунків необхідні дані щодо параметрів шарів, крізь які відбувається теплоперенесення. Це товщини, питомі теплоємності, густини і коефіцієнти теплопровідності кожного шару. Розрахунки надають можливість з прийнятною точністю визначити параметри захисного шару, який забезпечує нормативний тепловий режим тіла працюючого.

3. Враховуючи можливі розбіжності у значеннях необхідних констант та наявність побічних впливів на процес теплоперенесення, у розрахунки прогнозованого термозахисту необхідно додавати певний запас ефективності.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. INTERNATIONAL ISO STANDARD 15743 First edition 2008-07-01 Ergonomics of the thermal environment — Cold workplaces — Risk assessment and management Ergonomie des ambiances thermiques — Lieux de travail dans le froid — Évaluation et management des risques Reference number ISO 15743:2008(E).
2. Костенко Т. В., Костирка О. В. 2018. Пропозиції щодо покращення теплового стану в піддежному просторі рятувальника. Вісті Донецького гірничого інституту. - № 1. - С. 53-60. doi:10.31474/1999-981x-2018-1-53-60
3. Болібрux Б. В. 2017. Визначення граничного часу роботи пожежника в теплозахисному одязі на основі тривимірної моделі. Науковий Вісник ХНУ. – Хмельницький, – № 1. – С. 95-104.
4. Rintamäki H. 2007. Human responses to cold. Alaska Med.;49(2 Suppl):29-31
5. Karjalainen S. 2012. Thermal comfort and gender: a literature review. Indoor Air Apr;22(2):96-109. doi: 10.1111/j.1600-0668.2011.00747.x.
6. Schaudienst Falk & Vogdt, Frank. (2017). Fanger's model of thermal comfort: a model suitable just for men? Energy Procedia. 132. 129-134. doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.658.
7. Тихонов А.Н., Самарский А.А. (1977). Уравнения математической физики. «Наука». 736 с.

Received (Надійшла) 22.07.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.09.2022

### Methodology for determining the level of protection of workers in conditions of extraordinary temperature influences

V. Glyva, O. Zemlyanska, O. Ilchuk

**Abstract.** The protection of workers in conditions of non-regulatory (extreme) temperatures (low and high) requires the availability of effective protective materials and clothing made from them. To rationalize thermal protection, it is advisable to pre-evaluate its effectiveness under certain conditions, which can be carried out using calculation methods. For this, the basic equation of thermal conductivity in one-dimensional form is used. With the availability of data on thicknesses, specific heat capacities, densities and coefficients of thermal conductivity of biological tissues (skin, bones), it is possible to calculate the required efficiency and parameters of the material of the protective layer. For this purpose, a method of calculating thermal conductivity coefficients of each of the layers through which heat transfer occurs is provided. An explicit difference scheme was used for the numerical solution of the modeling equation. The obtained dependences provide values of thermal conductivity coefficients at the boundaries of layers with different thermophysical parameters. The number of nodes along the selected axis and grid step are chosen in each specific case, based on the required accuracy of the calculation. Taking into account possible discrepancies in the values of constants and coefficients, as well as the ambiguity of external atmospheric influences, it is necessary to include a certain margin of protection efficiency in the calculations.

**Keywords:** temperature effect, thermal conductivity, protection, coefficient of thermal conductivity.



С. В. Скоробогатько, Г. В. Фесенко

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

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЛІТАЮЧИХ ХМАРНИХ, ГРАНИЧНИХ ТА ТУМАННИХ ОБЧИСЛЕНЬ КОМПОНЕНТАМИ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

**Анотація.** У статті проведено порівняльний аналіз технологій літаючих хмарних (ЛХО), граничних (ЛГО) та туманних (ЛТО) обчислень. Показані особливості систем, побудованих з використанням цих технологій, визначені їх переваги та недоліки. Розглянуто варіанти схем організації ЛХО, ЛГО та ЛТО. Обґрунтовано доцільність та запропоновано варіант застосування ЛХО, ЛГО та ЛТО компонентами системи моніторингу (СМ) потенційно небезпечного об'єкту (ПНО) з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Оцінено перспективи використання методів штучного інтелекту (ШІ) підсистемами компонентів СМ ПНО. Запропоновано варіант використання методів ШІ для розширення можливостей ЛХО, ЛГО та ЛТО під час виконання СМ ПНО завдань з розвантаження обчислень, розподілу ресурсів, підтримки прийняття рішень, забезпечення безпеки та планування маршрутів руху БПЛА.

**Ключові слова:** хмарні обчислення, граничні обчислення, туманні обчислення, безпілотний літаючий апарат, хмарні технології, штучний інтелект, система моніторингу, потенційно небезпечний об'єкт.

### Мотивація

Літаючі граничні обчислення (ЛГО) на основі БПЛА наразі розглядаються у якості життєво важливої технології для впровадження багатьох методів для IoT-застосунків перспективних систем моніторингу (СМ) потенційно небезпечних об'єктів (ПНО) наступного покоління. Безумовно, для того, щоб архітектура СМ ПНО було більш гнучкою, ресурсно- та енергоефективною, ця технологія може реалізовуватися у поєднанні з технологіями літаючих хмарних (ЛХО) та туманних (ЛТО) обчислень, а також наземних граничних (НГО), хмарних (НХО) та туманних (НТО) обчислень. При цьому можливості цих технологій можуть бути значно розширені за рахунок використання ними для вирішення певних завдань методів штучного інтелекту (ШІ). Завдяки своїй універсальності та простоті розгортання, БПЛА у такій архітектурі можуть відігравати різні ролі:

- виступати у ролі мобільних пристроїв, які переважують свої обчислення на наземний сервер;
- діяти як багатоцільова підсистема ЛГО (ЛХО, ЛТО), що відповідає за моніторинг групи мобільних кінцевих вузлів та може одночасно служити ретранслятором або шлюзом між мобільними кінцевими вузлами та наземним сервером. Тому, актуальними є питання дослідження особливостей ЛГО, ЛХО та ЛТО в контексті їх застосування в інтесакх СМ ПНО.

**Метою статті** є дослідити особливості застосування літаючих хмарних, граничних та туманних обчислень та запропонувати рекомендації щодо їх використання компонентами системи моніторингу потенційно небезпечних об'єктів.

**Задачі дослідження** полягають у наступному:

- провести порівняльний аналіз технологій ЛХО, ЛГО та ЛТО з визначенням особливостей систем, побудованих на їх основі, а також основних переваг та недоліків таких технологій;
- обґрунтувати доцільність та запропонувати варіант застосування ЛХО, ЛГО та ЛТО компонентами СМ ПНО;

– оцінити перспективи використання методів ШІ підсистемами компонентів СМ ПНО для розширення можливостей ЛХО, ЛГО та ЛТО.

### Аналіз основних публікацій та досліджень

У [1] ЛХО, ЛГО та ЛТО розглядаються як складові технології Інтернету літаючих речей (Internet of Flying Things (IoFT)), відомої також під назвою «Інтернет дронів» (Internet of drones (IoD)). IoFT (IoD) – це багатошарова архітектура, яка акумулює переваги бездротових динамічних (самоорганізованих) літаючих мереж (Flying Ad hoc Networks (FANET)) та Інтернету речей (Internet of Things (IoT)) і призначена для управління літаючою мережею і надання швидкого доступу БПЛА до контрольованого простору, інтернет-ресурсів і хмарного середовища. Далі ми проведемо аналіз основних публікацій з питань використання ЛХО, ЛГО, ЛТО у різних доменах.

*Аналіз публікацій, присвячених ЛХО.* Автори статті [2] запропонували ресурсно-орієнтовану архітектуру, яка призначена для полегшення моделювання ресурсів і послуг, що надаються БПЛА. БПЛА при цьому оснащені платою Arduino, бортовим Wi-Fi обладнанням та виступають у ролі серверів, доступ до хмарних ресурсів яких можна отримати за допомогою інтерфейсів прикладного програмування.

У [3] автори розширили можливості свого прототипу, представленого у [2] за рахунок інтеграції плати Arduino з датчиками вимірювання вологості й температури повітря, а також створення можливості керування цими датчиками через інтерфейс за допомогою веб-служб RESTful.

Автори [4] представили хмарну архітектуру, яка призначена для забезпечення ефективної взаємодії БПЛА та бездротових сенсорних мереж. У цій архітектурі рівень фізичних ресурсів БПЛА є відокремленим від рівня керування і включає програмне забезпечення, програмно визначені мережі й мережеву функціональну віртуалізацію.

У [5] було розглянуто хмарну платформу для керування БПЛА, яка дозволяє користувачам і

хмарній платформі одночасно взаємодіяти з БПЛА. Користувачі вводять необхідні параметри, а хмарна платформа, яка має інтернет-зв'язок з наземною станцією управління (НСУ), бере на себе функції контролю БПЛА відповідно до вимог користувача.

Автори [6] запропонували структуру, що дозволяє користувачам за допомогою хмарного середовища отримати доступ до БПЛА, який виступає у ролі постачальника комерційних послуг. За оптимальним використанням ресурсів БПЛА й забезпеченням встановлених безпекових вимог у цій структурі слідкує хмарний координатор. Він забезпечує зв'язок між користувачами та БПЛА, керує розподілом завдань і забезпечує доступ до БПЛА користувачів різних категорій.

У роботі [7] розглядається трирівнева хмарна архітектура, перший рівень якої представлено наземними бездротовими датчиками, другий рівень формують БПЛА з бортовою хмарною платформою, які отримують дані від датчиків і спрямовують їх до НСУ, а третій рівень — це центр керування хмарою, який відповідає за оброблення та аналізування зібраних даних для прийняття рішення.

У роботі [8] за допомогою мови Python реалізовано хмарний сервер, здатний аналізувати дані польоту БПЛА, а також дозволяє користувачам дистанційно керувати та візуалізувати БПЛА.

Автори [9] запропонували хмарну систему, яка дозволяє одночасно керувати декількома БПЛА та використовувати їх у процесі збирання й оброблення даних від наземних датчиків за допомогою хмарного середовища.

Стаття [10] розглядає можливості використання БПЛА разом з наземними серверами для реалізації хмарних обчислень під час функціонування еластичної мережі, що відповідає за збирання, оброблення й доставляння кінцевим користувачам мультимедійних файлів.

У [11] авторами запропоновано базову й загальну концептуальну модель хмарної платформи Cloud-SPHERE, яка здатна забезпечити безпечний канал зв'язку між БПЛА у складі флоту та між БПЛА та наземною інфраструктурою за рахунок реалізації механізмів ідентифікації, автентифікації й захисту даних.

*Аналіз публікацій, присвячених ЛГО.* Робота [12] була присвячена описанню особливостей функціонування архітектури ЛГО, де БПЛА забезпечують надання необхідних послуг користувачам у зонах стихійних лих з пошкодженою наземною інфраструктурою зв'язку.

Також у цій роботі надано рекомендації щодо оптимізації кількості й місць розміщення БПЛА для більш ефективної реалізації граничних обчислень в інтересах користувачів.

У роботі [13] запропоновано архітектуру для наземно-повітряної інтегрованої мобільної периферійної мережі з назвою AG630 MEN, у складі якої розгортаються БПЛА, які відіграють роль граничних мережевих контролерів для ефективного розподілу обчислювальних ресурсів і ресурсів зберігання даних.

Автори статті [14] демонструють можливості розробленого ними фреймворку, який поєднує в собі можливості наземних транспортних засобів і БПЛА щодо розгортання граничних серверів для організації зв'язку, проведення необхідних обчислень і забезпечення зберігання необхідної інформації. Результати проведених авторами цієї статті експериментів підтвердили, що застосування розробленого фреймворку забезпечує високу мобільність і пропускну здатність, а також низьку затримку.

Для гарантування високої якості обслуговування для ресурсомістких та он-лайн застосунків у статті [15] запропонована гібридна модель хмарних і граничних обчислень для роїв БПЛА. Ця модель розширює ємність ресурсів БПЛА за рахунок використання граничних серверів, які здатні обробляти дані з низькою затримкою. Також ця стаття описує алгоритм взаємодії граничних та хмарних обчислень для оброблення та зберігання великих даних у хмарі.

Представлена у [16] бездротова мобільна система використовує БПЛА для розвантаження обчислювальних завдань, вирішуваних мобільними наземними користувачами, а також дозволяє мінімізувати енергоспоживання БПЛА шляхом спільної оптимізації розвантаження обчислень та побудови траєкторії польоту БПЛА. Результати моделювання показали, що запропонована система перевершує інші еталонні схеми з точки зору конвергенції.

У [17] ті ж автори розглянули можливість застосування розробленої у [16] системи для максимізації швидкості обчислень шляхом реалізації двох алгоритмів оптимізації граничних обчислень на борту БПЛА, його енергетичних ресурсів та траєкторії польоту.

Алгоритм розвантаження завдань користувачів шляхом застосування граничних обчислень на БПЛА-серверах з подальшим обробленням результатів на визначених точках доступу представлено у [18]. Цей алгоритм також дозволяє оптимізувати розподіл обчислювальних ресурсів між БПЛА й користувачами, а також оптимізувати розподіл смуги пропускання та траєкторію польоту БПЛА.

У [19] було продемонстровано можливості використання технологій напівмарківського процесу прийняття рішень і глибокого навчання з підкріпленням для максимізації пропускну здатності БПЛА-сервера, що виконує граничні обчислення в режимі реального часу в інтересах наземних користувачів.

У [20] автори застосували методи теорії ігор для вирішення проблеми розвантаження обчислень в літаючих бездротових мережах з одночасним зменшенням витрат енергетичних ресурсів БПЛА та затримки виконання завдань. Відповідно до запропонованого підходу у якості гравців, що взаємодіють між собою під час виконання обчислювальних завдань, розглядаються БПЛА, НСУ та граничний сервер. Завдання обробляється на борту БПЛА, після чого розвантажується на найближчу НСУ або на граничний сервер.

У статті [21] обговорені проблеми застосування багаторівневої архітектури мережі 5G, у якій

БПЛА виступають у ролі літаючих вузлів граничних обчислень.

Робота [22] пропонує ітераційний алгоритм кластеризації з ефективним покриттям, який передбачає застосування методів координатного та блочного спуску для вирішення задачі максимізації покриття сенсорів БПЛА, що виконують граничні обчислення, при обмеженнях на час затримки.

*Аналіз публікацій, присвячених ЛТО.* Представлені у [23] дослідження стосувалися проблеми застосування ЛТО в інтересах Індустрії 4.0. У цій статті була детально описана структура, у якій БПЛА, що реалізують ЛТО, розвантажують завдання, виконувани наземними датчиками, а також за допомогою жадібного алгоритму оптимізують розподіл таких завдань з метою максимізації їх виконаної кількості за визначений проміжок часу.

Представлена авторами [24] система ЛТО під назвою UAVFog, використовуючи туманні обчислення та мобільність БПЛА, дозволяє забезпечити зберігання необхідної кількості даних, гнучкий зв'язок, низьку затримку для IoT-застосунків, а також постачає послуги Інтернету речей: брокерські послуги й послуги на основі місцезнаходження.

У роботі [25] досліджувалися аспекти розвантаження завдань за допомогою БПЛА у ієрархічній системі туманних обчислень. Для ефективної взаємодії БПЛА, де реалізуються ЛТО, і наземного хмарного середовища, де здійснюються основні обчислення та зберігаються їх результати, використовувалася технологія множинних входів і множинних виходів (Multiple Input Multiple Output (MIMO)).

У [26] авторами запропоновано підхід щодо інтеграції туманних обчислень із ройовою системою БПЛА для виконання обчислень на борту БПЛА з низькою затримкою й високим рівнем надійності. Крім того, автори продемонстрували можливості розробленого ними генетичного евристичного алгоритму для оптимізації розподілу завдань з метою максимально зменшення енергетичних ресурсів БПЛА.

У роботі [27] детально розглянуто особливості реалізації ЛТО у FANET, а також описані послуги на основі ЛТО, що можуть постачатися такими мережами.

Таким чином, основними проблемними питаннями, які підіймаються у літературних джерелах, присвячених застосуванню ЛХО, ЛГО та ЛТО, є наступні:

- масштабованість, надійність, усталеність та безпека запропонованих архітектур;
- розвантаження завдань;
- мінімізація енергоспоживання;
- розподіл ресурсів;
- організація зв'язку та покриття;
- затримки під час роботи в реальному часі;
- особливості управління БПЛА, їх взаємодія, траєкторії руху та оптимізація маршрутів;
- обробка та зберігання інформації у хмарному середовищі.

Варто також відзначити, що у представлених джерелах дуже часто говорять про літаючі обчис-

лення лише у зв'язку з наявністю БПЛА у складі запропонованих архітектур, хоча дуже часто ці архітектури передбачають наявність компонентів, відповідальних за проведення аналогічних наземних обчислень (НХО, НГО, НТО).

Саме поєднання наземної та літаючої обчислювальної складової робить більшість таких архітектур більш ефективними.

### Порівняльний аналіз технологій ЛХО, ЛГО та ЛТО

На основі розглянутих вище основних публікацій за цією тематикою авторами було проведено порівняльний аналіз технологій ЛХО, ЛГО та ЛТО з визначенням особливостей архітектури рішень на їх основі, а також основних переваг та недоліків. Результати аналізу подані у табл. 1.

Як ми можемо бачити з табл. 1, архітектури ЛГО та ЛТО мають переваги над архітектурами ЛХО у гнучкості та енергоефективності, однак поступаються їм у потужності засобів оброблення та зберігання інформації.

### Варіанти схем організації літаючих хмарних, граничних та туманних обчислень

Враховуючи підходи щодо організації ЛХО, ЛГО та ЛТО, розглянуті у проаналізованих джерелах і варіанти архітектур з реалізацією таких обчислень, поданих у [28], розглянемо приклади різних варіантів схем організації ЛХО, ЛГО та ЛТО (рис. 1-3).

Запропонований на рис. 1 варіант схеми організації ЛХО може бути застосований у сценарії підтримки прийняття рішень під час ліквідації надзвичайних ситуацій, коли всі кінцеві пристрої (КП) КП-1, КП-2, ... КП-*m* можуть обмінюватися інформацією один з одним, але не мають доступу до зовнішнього світу (немає Інтернету). Локальні послуги (наприклад, розвантаження завдань) надаються на рівні наземних граничних обчислень (шляхом застосування наземних вузлів граничних обчислень НВГО-1, НВГО-2, ... НВГО-*k*) або на рівні наземних туманних граничних обчислень (шляхом застосування наземних вузлів туманних обчислень НВТО-1, НВТО-2, ... НВТО-*r*).

Глобальні ж послуги (наприклад, збирання даних, забезпечення безпекових функцій, застосування обчислювальних ресурсів, підтримка прийняття рішень) надаються флотом БПЛА, який виступає у ролі підсистеми літаючих хмарних обчислень (ПсЛХО), а БПЛА флоту – у ролі літаючих вузлів хмарних обчислень ЛВХО-1, ЛВХО-2, ... ЛВХО-*s*.

У варіанті схеми ЛГО (рис. 2) флот БПЛА, який виступає у якості підсистеми літаючих граничних обчислень (ПсЛГО), перебуває поблизу джерел даних (кінцевих пристроїв КП-1, КП-2, ... КП-*m*), надає їм необхідні послуги та здійснює необхідні для них обчислення на літаючих вузлах граничних обчислень ЛВГО-1, ЛВГО-2, ... ЛВГО-*n*. Близькість зазначених вузлів до джерел даних дозволяє зменшити час затримки, покращити пропускну здатність, а також збільшити термін служби мережі за рахунок більш ефективного використання ресурсу батареї кінцевих пристроїв.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз технологій літаючих хмарних, граничних та туманних обчислень

Вид	Особливості архітектури	Основні переваги	Основні недоліки
Літаючі хмарні обчислення	Централізована обробка. Швидкий доступ через Інтернет до великої кількості даних.	Масштабованість. Економічна ефективність. Використання надійного TCP/IP протоколу.	Великий час затримки. Обмежена пропускна здатність. Вразливості системи безпеки. Відсутність автономного режиму. Проблема обробки інформації у разі, якщо багато пристроїв надсилають дані одночасно. Обмежений ресурс батареї. Єдина точка відмови.
Літаючі граничні обчислення	Немає потреби у стаціонарній комунікаційній інфраструктурі. Літаючий вузол діє як підсистема комунікації та зв'язку. Літаючий вузол знаходиться ближче до кінцевих пристроїв.	Гнучкість. Масштабованість. Енергоефективність. Здатність працювати з мобільними кінцевими пристроями. Можливість автономного виконання процесів, правил та алгоритмів.	Обмежений ресурс батареї літаючого вузла. Єдина точка відмови.
Літаючі туманні обчислення	Децентралізована обробка. Поширює можливості хмарного середовища до границі мережі.	Гнучкість. Масштабованість. Енергоефективність. Низька затримка передачі даних та кращий взаємозв'язок з кінцевими пристроями. Поліпшені можливості використання технологій бездротового доступу. Розширені можливості для застосунків, що працюють у реальному часі.	Обмежений ресурс батареї літаючого вузла. Єдина точка відмови. Дані можуть надсилатися до літаючого вузла складними маршрутами, що збільшує імовірність їхньої часткової або повної втрати.

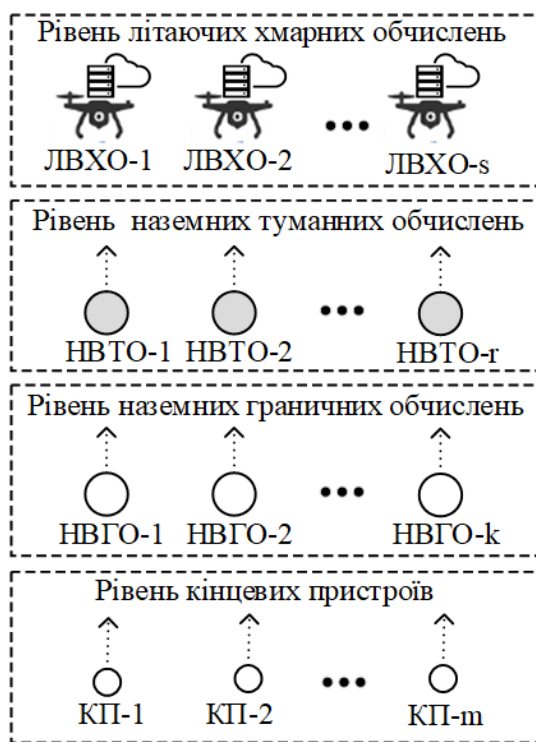


Рис. 1. Варіант схеми організації літаючих хмарних обчислень

Якщо ж підсистема літаючих граничних обчислень не може надати необхідну послугу, вона

створює можливість надання цієї послуги за допомогою НХО.

У варіанті схеми ЛТО (рис. 3) флот БПЛА, який виступає у ролі підсистеми літаючих туманних обчислень (ПсЛТО), а БПЛА флоту – у ролі літаючих вузлів туманних обчислень ЛВТО-1, ЛВТО-2, ... ЛВТО-r, поєднує за допомогою бездротових каналів наземні хмарні сервери та кінцеві пристрої КП-1, КП-2, ... КП-m з метою забезпечення більш високої ємності зберігання, швидкості обчислень, а також невеликого часу затримки для кінцевих пристроїв КП-1, КП-2, ... КП-m.

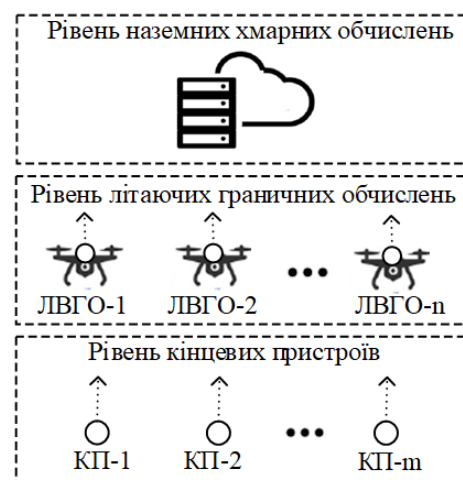


Рис. 2. Варіант схеми організації літаючих граничних обчислень

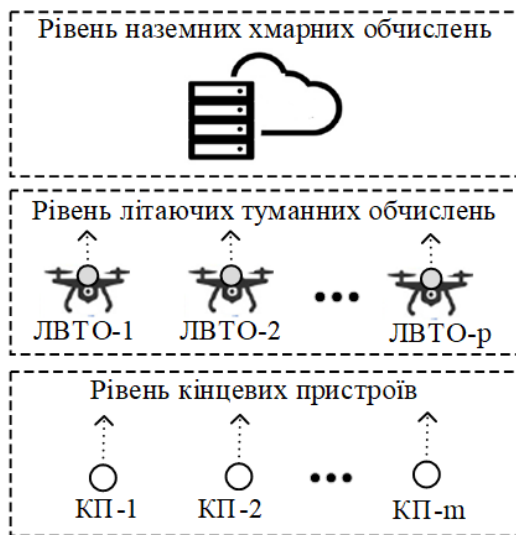


Рис. 3. Варіант схеми організації літаючих туманних обчислень

### Компоненти перспективної системи моніторингу потенційно небезпечних об'єктів та доцільність використання ними хмарних, граничних та туманних обчислень

На думку авторів, ЛХО, ЛГО та ЛТО разом з наземними видами таких обчислень можуть бути затребувані під час розробки перспективних СМ ПНО.

Таблиця 2 – Варіант застосування хмарних, граничних та туманних обчислень компонентами СМ ПНО

Види обчислень		Компоненти СМ ПНО				
		ПНО	Флот БПЛА	ПДП	КЦ	ГЗЕ
Хмарні обчислення	літаючі	–	+	–	–	–
	наземні	–	–	+	+	+
Граничні обчислення	літаючі	–	+	–	–	–
	наземні	+	–	–	–	–
Туманні обчислення	літаючі	–	+	–	–	–
	наземні	–	–	–	–	–

З табл. 2 видно, що найбільш затребуваними є хмарні обчислення, які реалізуються як літаючим компонентом (флотом БПЛА), так і трьома наземними компонентами (ПДП, КЦ, ГЗЕ), а найменш затребуваними – туманні обчислення, які реалізуються тільки літаючим компонентом (флотом БПЛА).

Табл. 3 показує, що найбільша кількість підсистем може бути розгорнута у складі флоту БПЛА, оскільки на нього можуть бути покладені завдання з проведення одразу трьох видів обчислень – ЛХО, ЛГО та ЛТО.

### Перспективи використання методів штучного інтелекту підсистемами СМ ПНО, що використовує ЛХО, ЛГО та ЛТО

Застосування методів штучного інтелекту для мережних завдань набуло популярності протягом останніх кількох десятиліть. Наприклад, штучний інтелект широко використовується в мережній сфері

Розглянемо перспективну СМ ПНО, до якої входять такі основні компоненти:

– ПНО, який містить об'єкти контролю, до яких, як правило, належать критичні з точки зору безпеки технологічні установки;

– кризовий центр (КЦ), призначений для відпрацювання рішень, спрямованих на попередження та ліквідацію наслідків аварій на ПНО, а також прогнозування виникнення таких аварій і оцінки їх наслідків;

– флот БПЛА, який здійснює функції збору, часткової обробки та передачі моніторингової інформації до КЦ;

– пункт дистанційного пілотування (ПДП), який забезпечує здійснення зовнішнім пілотом (оператором) керування та контроль БПЛА на землі та в повітрі;

– група зовнішніх експертів (ГЗЕ), які дистанційно беруть участь разом з відповідним персоналом КЦ у відпрацювання рішень, спрямованих на попередження та ліквідацію наслідків аварій на ПНО.

Зважаючи на виконувани СМ ПНО завдання, автори пропонують використовувати компонентами СМ ПНО ті чи інші види літаючих та наземних обчислень відповідно до таблиці 2. Для реалізації цих видів обчислень у складі компонентів СМ ПНО можуть розгортатися одна або декілька підсистем (табл. 3).

завдяки своїй здатності взаємодіяти зі складним середовищем для інтелектуалізації процесу прийняття рішень.

Таблиця 3 – Підсистеми у складі компонентів СМ ПНО, створювані для реалізації хмарних, граничних та туманних обчислень

Компонент СМ ПНО	Назва підсистеми
ПНО	ПсНГО-ПНО
Флот БПЛА	ПсЛХО-Ф
	ПсЛГО-Ф
	ПсЛТО-Ф
ПДП	ПсНХО-ПДП
КЦ	ПсНХО-КЦ
ГЗЕ	ПсНХО-ГЗЕ

Використання методів ШІ може покращувати продуктивність мережі в багатьох субдоменах, таких як розподіл ресурсів, прогнозування й класифікація мережевого трафіку, контроль перевантаження та маршрутизація. Підсистеми СМ ПНО, які формують як наземні, так і літаючі мережі на основі БПЛА, а також використовують ЛХО, ЛГО та ЛТО для розширення своїх можливостей, повинні забезпечувати безперебійне з'єднання, відповідати вимогам якості обслуговування для багатьох кінцевих пристроїв, обробляти величезний обсяг даних, створених фізичним середовищем. Методи ШІ, які пропонують надійний аналіз, навчання, оптимізацію та можливості інтелектуального розпізнавання, можуть бути інтегровані в підсистеми СМ ПНО для інтелектуальної оптимізації продуктивності, виявлення необхідної моніторингової інформації, розширеного навчання, організації структури та підтримки прийняття складних рішень щодо прогнозування наслідків аварій на ПНО та реагування на такі аварії.

На підставі проведеного аналізу авторами було сформовано перелік завдань, виконуваних підсистемами СМ ПНО з використанням різних методів штучного інтелекту (табл. 4).

Методами, що використовуються, є такі [29]:

- DL – deep learning (глибоке навчання);
- DSL – deep supervised learning (глибоке кероване навчання);
- DRL – deep reinforcement learning (глибоке навчання з підкріпленням);
- FI – fuzzy inference (нечітке виведення);
- FL – federated learning (федеративне навчання);
- GA – genetic algorithm (генетичний алгоритм);
- RL – reinforcement learning (навчання з підкріпленням);
- RL-ACO – reinforcement learning based on ant colony optimization (навчання з підкріпленням на основі алгоритму оптимізації мурашиної колонії).

Таблиця 4 – Завдання, виконувани підсистемами СМ ПНО з використанням різних методів штучного інтелекту

Завдання	Метод ШІ	Підсистеми СМ ПНО						
		ПєЛХО-Ф	ПєЛГО-Ф	ПєЛТО-Ф	ПєНГО-ПНО	ПєНХО-ПДЦ	ПєНХО-КЦ	ПєНХО-ГЗЕ
Розвантаження обчислень	RL	+	+	+	+	+	+	+
	DRL	+	+	+	+	+	+	+
	GA	+	+	+	+	+	+	+
	DL	+	+	+	+	+	+	+
	FI	+	+	+	+	+	+	+
Розподіл ресурсів	RL	+	–	–	+	+	+	+
	DRL	+	–	–	+	+	+	+
	GA	+	–	–	+	+	+	+
	RL-ACO	+	–	–	+	+	+	+
Підтримка прийняття рішень	RL	+	–	–	–	–	+	+
	DRL	+	–	–	–	–	+	+
	GA	+	–	–	–	–	+	+
	DL	+	–	–	–	–	+	+
	FI	+	–	–	–	–	+	+
	FL	+	–	–	–	–	+	+
Забезпечення безпеки	RL	+	+	+	+	+	+	+
	DRL	+	+	+	+	+	+	+
	GA	+	+	+	+	+	+	+
	DL	+	+	+	+	+	+	+
	FL	+	+	+	+	+	+	+
Планування маршрутів руху БПЛА	RL	+	–	+	–	+	–	–

Як ми можемо бачити з табл. 4:

– найбільш затребуваним є метод RL, який використовується для вирішення всього спектру представлених завдань та в інтересах всіх підсистем СМ ПНО;

– найменш затребуваним є метод RL-АСО, який використовується тільки для вирішення завдань розподілу ресурсів в інтересах п'яти із семи підсистем СМ ПНО;

– найбільше методів штучного інтелекту (RL, DRL, GA, DL, FI, FL) використовується під час вирішення завдань, пов'язаних з підтримкою прийняття рішень;

– найменше методів (RL) використовується для вирішення завдань, пов'язаних з плануванням маршрутів руху БПЛА.

### Висновки

Представлено результати порівняльного аналізу технологій ЛХО, ЛГО та ЛТО з визначенням особливостей архітектури рішень на їх основі, а також основних переваг та недоліків. Зазначені результати показали, що архітектури ЛГО та ЛТО мають переваги над архітектурами ЛХО у гнучкості та енергоефективності, однак поступаються їм у потужності засобів оброблення та зберігання інформації.

Розглянуто варіанти багаторівневих схем організації ЛХО, ЛГО та ЛТО й показані особливості взаємодії літаючих вузлів з кінцевими пристроями.

Запропоновано варіант застосування ЛХО, ЛГО та ЛТО компонентами СМ ПНО. У цьому варіанті найбільш затребуваними є хмарні обчислення, які реалізуються як літаючим компонентом (флотом

БПЛА), так і трьома наземними компонентами (ПДП, КЦ, ГЗЕ), а найменш затребуваними – туманні обчислення, які реалізуються тільки літаючим компонентом (флотом БПЛА). Показано, які підсистеми у складі компонентів СМ ПНО повинні бути створені для реалізації вказаних обчислень. Найбільшу кількість підсистем необхідно розгорнути у складі флоту БПЛА, оскільки на нього можуть бути покладені завдання з реалізації одразу трьох видів обчислень – ЛХО, ЛГО та ЛТО.

Запропоновано варіант використання методів ШІ для розширення можливостей ЛХО, ЛГО та ЛТО під час виконання СМ ПНО завдань з розвантаження обчислень, розподілу ресурсів, підтримки прийняття рішень, забезпечення безпеки й планування маршрутів руху БПЛА.

Відповідно до цього варіанту найбільш затребуваним є метод RL, який використовується для вирішення всього спектру представлених завдань та в інтересах всіх підсистем СМ ПНО, а найменш затребуваним – метод RL-АСО, який використовується тільки для вирішення завдань розподілу ресурсів в інтересах п'яти із семи підсистем СМ ПНО. Найбільше методів штучного інтелекту (RL, DRL, GA, DL, FI, FL) використовується під час вирішення завдань, пов'язаних з підтримкою прийняття рішень, а найменше – під час вирішення завдань, пов'язаних з плануванням маршрутів руху БПЛА.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення моделей оптимізації кількості літаючих вузлів (БПЛА) у складі підсистем ЛХО, ЛГО та ЛТО за критерієм швидкості обробки моніторингової інформації.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Zaidi S., Atiqzaman M., Calafate T. Internet of flying things (IoFT): A survey. *Computer Communications*. 2020. Vol. 165. P. 53–74. DOI: 10.1016/j.comcom.2020.10.023.
- Mahmoud S., Mohamed N. Broker architecture for collaborative UAVs cloud computing. *2015 International Conference on Collaboration Technologies and Systems. CTS'2015* : proceedings, 1–5 June 2015, Atlanta, GA, USA. P. 212–219. DOI: 10.1109/CTS.2015.7210423.
- Mahmoud S., Mohamed N., Al-Jaroodi J. Integrating UAVs into the Cloud Using the Concept of the Web of Things. *Journal of Robotics*. 2015. Vol. 2015. Article ID 631420. DOI: 10.1155/2015/631420.
- Sara M., Jawhar I., Nader M. A softwarization architecture for UAVs and WSNs as Part of the cloud environment. *2016 International Conference on Cloud Engineering Workshops. IC2EW'2016* : proceedings, 4–8 April 2016, Berlin, Germany. P. 13–189. DOI: 10.1109/IC2EW.2016.17.
- Majumder S., Prasad M. S. Cloud based control for unmanned aerial vehicles. *2016 3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks. SPIN'2016* : proceedings, 11–12 February 2016, Noida, India. P. 421–424. DOI: 10.1109/SPIN.2016.7566731.
- Yapp J., Seker R., Babiceanu R. UAV as a service: Enabling on-demand access and on-the-fly re-tasking of multi-tenant UAVs using cloud services. *2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference. DASC'2016* : proceedings, 25–29 September 2016, Sacramento, CA, USA. P. 1–8. DOI: 10.1109/DASC.2016.7778007.
- Youssef S. B. H., Rekhis S., Boudriga N., Bagula A. A cloud of UAVs for the delivery of a sink as a service to terrestrial WSNs. *2016 14th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multi Media. MoMM'16* : proceedings, 28–30 November 2016, Singapore, Singapore. P. 317–326. DOI: 10.1145/3007120.3007138.
- Zhang Y., Yuan Z. Cloud-based UAV data delivery over 4G network. *2017 10th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Network. ICMU'2017* : proceedings, 03–05 October 2017, Toyama, Japan. P. 1–2. DOI: 10.23919/ICMU.2017.8330084.
- Hong C., Shi D. A cloud-based control system architecture for multi-UAV. *2018 3rd International Conference on Robotics, Control and Automation. ICRA'2018* : proceedings, 11–13 August 2018, Chengdu, China. P. 25–30. DOI: 10.1145/3265639.3265652.
- Stan R. G., Negru C., Pop F. CloudWave: Content gathering network with flying clouds. *Future Generation Computer Systems*. 2019. Vol. 98. P. 474–486. DOI: 10.1016/j.future.2019.03.033.
- Rodrigues M., Branco K. R. L. J. Cloud-SPHERE: Towards Secure UAV Service Provision. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2020. Vol. 97. P. 249–268. DOI: 10.1007/s10846-019-01046-6.

12. Narang M., Xiang S., Liu W., Gutierrez J., Chiaraviglio L., Sathiseelan A., Merwaday A. UAV-assisted edge infrastructure for challenged networks. *2017 IEEE Conference on Computer Communications Workshops. INFOCOM WKSHPs '2017*: proceedings, 01–04 May 2017, Atlanta, GA, USA. P. 60–65. DOI: 10.1109/INFOCOMW.2017.8116353.
13. Cheng N., Xu W., Shi W., Zhou Y., Lu N., Zhou H., Shen X. Air-Ground Integrated Mobile Edge Networks: Architecture, Challenges, and Opportunities. *IEEE Communications Magazine*. 2018. Vol. 56. P. 26–32. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1701092.
14. Zhou Z., Feng J., Tan L., He Y., Gong, J. An Air-Ground Integration Approach for Mobile Edge Computing in IoT. *IEEE Communications Magazine*. 2018. Vol. 56. P. 40–47. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1701111.
15. Chen W., Liu B., Huang H., Guo S., Zheng Z. When UAV Swarm Meets Edge-Cloud Computing: The QoS Perspective. *IEEE Network*. 2019. Vol. 33. P. 36–43. DOI: 10.1109/MNET.2019.1800222.
16. Zhou F., Wu Y., Sun H., Chu Z. UAV-Enabled mobile edge computing: Offloading optimization and trajectory design. *2018 IEEE International Conference on Communications. ICC '2018*: proceedings, 20–24 May 2018, Kansas City, MO, USA. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICC.2018.8422277.
17. Zhou F., Wu Y., Hu R. Q., Qian Y. Computation rate maximization in UAV-Enabled wireless-powered mobile-edge computing systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2018. Vol. 36. P. 1927–1941. DOI: 10.1109/JSAC.2018.2864426.
18. Hu X., Wong K.-K., Yang K., Zheng Z. UAV-Assisted Relaying and Edge Computing: Scheduling and Trajectory Optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2019. Vol. 18. P. 4738–4752. DOI: 10.1109/TWC.2019.2928539.
19. Li J., Liu Q., Wu P., Shu F., Jin S. Task Offloading for UAV-based Mobile Edge Computing via Deep Reinforcement Learning. *2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China. ICC'2018*: proceedings, 16–18 August 2018, Beijing, China. P. 798–802. DOI: 10.1109/ICCChina.2018.8641189.
20. Messous M. A., Senouci S. M., Sedjelmaci H., Cherkaoui S. A Game Theory Based Efficient Computation Offloading in an UAV Network. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. Vol. 68. P. 4964–4974. DOI: 10.1109/TVT.2019.2902318.
21. Nguyen V. D., Khanh T. T., Van Nam P., Thu N. T., Seon Hong C., Huh E. N. Towards Flying Mobile Edge Computing. *2020 International Conference on Information Networking. ICOIN'2020*: proceedings, 07–10 January 2020, Barcelona, Spain. P. 723–725. DOI: 10.1109/ICOIN48656.2020.9016537.
22. You W., Dong C., Cheng X., Zhu X., Wu Q., Chen G. Joint Optimization of Area Coverage and Mobile-Edge Computing with Clustering for FANETs. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. Vol. 8. P. 695–707. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3006891.
23. Lee G., Saad W., Bennis M. Online Optimization for UAV-Assisted Distributed Fog Computing in Smart Factories of Industry 4.0. *2018 IEEE Global Communications Conference. GLOBECOM'2018*: proceedings, 09–13 December 2018, Abu Dhabi, United Arab Emirates. P. 1–3 DOI: 10.1109/GLOCOM.2018.8647441.
24. Mohamed N., Al-Jaroodi J., Jawhar I., Noura H., Mahmoud S. UAVFog: A UAV-based fog computing for Internet of Things. *2017 IEEE SmartWorld Ubiquitous Intelligence and Computing, Advanced and Trusted Computed, Scalable Computing and Communications, Cloud and Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation, SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCOM/IOP/SCI'2017*: proceedings, 04–08 August 2017, San Francisco, CA, USA. P. 1–8. DOI: 10.1109/UIC-ATC.2017.8397657.
25. Ti N. T., Bao Le L. Joint resource allocation, computation offloading, and path planning for UAV based hierarchical fog-cloud mobile systems. *2018 IEEE 7th International Conference on Communications and Electronics. ICCE'2018*: proceedings, 18–20 July 2018, Hue, Vietnam. P. 373–378. DOI: 10.1109/CCE.2018.8465572.
26. Hou X., Ren Z., Cheng W., Chen C., Zhang H. Fog Based Computation Offloading for Swarm of Drones. *2019 IEEE International Conference on Communications. ICC'2019*: proceedings, 20–24 May 2019, Shanghai, China. Vol. 2019. DOI: 10.1109/ICC.2019.8761932.
27. Devraj, Rao R. S., Das S. Fog Computing Environment in Flying Ad-hoc Network. *Cloud Computing Enabled Big-Data Analytics in Wireless Ad-hoc Networks*: collective monograph / ed. by S. Das, R. S. Rao, I. Das, V. Jain, N. Singh. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2022. P. 31–48. DOI: 10.1201/9781003206453-3.
28. Uddin M. A., Ayaz M., Mansour A., Aggoune, el H. M., Sharif Z., Razzak I. Cloud-connected flying edge computing for smart agriculture. *Peer-to-Peer Networking and Applications*. 2021. Vol. 14. P. 3405–3415. DOI: 10.1007/s12083-021-01191-6.
29. Yazid Y., Ez-Zazi I., Guerrero-González A., El Oualkadi A., Arioua M. UAV-enabled mobile edge-computing for IoT based on AI: A comprehensive review. *Drones*. 2021. Vol. 5. Article ID 631420. DOI: 10.3390/drones5040148.

Received (Надійшла) 21.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.11.2022

### Prospects for the use of flying cloud, boundary and fog computing by components of monitoring systems of potentially dangerous objects

S. Skorobohatko, H. Fesenko

**Abstract.** The article provides a comparative analysis of the technologies of flying cloud computing (FCC), flying edge computing (FEC), and flying fog computing (FFC). Features of systems built using these technologies are shown and the advantages and disadvantages of the technologies are determined. Variants of FCC, FEC, and FFC organization schemes were considered. The expediency is substantiated and the option of utilizing FCC, FEC, and FFC by components of the monitoring system (MS) for the potentially dangerous object (PDO) with unmanned aerial vehicles (UAVs) is proposed. The prospects for using artificial intelligence (AI) methods by the subsystems of the components of the MS PDO were evaluated. A variant of using AI methods is proposed to expand the capabilities of FCC, FEC, and FFC during the execution of MS PDO tasks on offloading calculations, resource allocation, decision-making support, ensuring safety, and UAV path planning.

**Keywords:** cloud computing, edge computing, fog computing, unmanned aerial vehicles, cloud technologies, artificial intelligence, monitoring system, potentially dangerous object.



О. О. Ченчева<sup>1</sup>, В. В. Ченчевой<sup>1</sup>, В. С. Бахарев<sup>1</sup>, М. Ю. Литвиненко<sup>1</sup>, Є. Є. Лашко<sup>1</sup>, С. М. Герашенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна

<sup>2</sup> Кременчуцьке районне управління ГУ ДСНС України в Полтавській області, Кременчук, Україна

## ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ДОПОВНЕНОЇ ТА ВІРТУАЛЬНОЇ РЕАЛЬНОСТІ ДЛЯ НАБУТТЯ HARD AND SOFT SKILLS ПРИ НАВЧАННІ СПЕЦІАЛІСТІВ ЦИВІЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ

**Анотація.** **Мета.** Аналіз можливості використання технологій доповненої та віртуальної реальності для створення дистанційних онлайн-курсів з метою забезпечення набуття «hard» та «softskills» спеціалістів з цивільної безпеки в умовах дистанційного навчання зумовленого бойовими діями. **Предмет.** Систематизація методів та принципів використання технологій доповненої та віртуальної реальності у процесі підготовки здобувачів зі спеціальності 263 Цивільна безпека в умовах змішаного навчання. У статті досліджено проблеми набуття hardskills та softskills студентами під час дистанційного навчання. Визначено фактори, які формують комунікативні та професійні навички. Обґрунтовано проблеми формування змісту фахової підготовки, добору форм і методів роботи зі здобувачами з метою ефективного навчання необхідним для професійної діяльності компетенціям і навичкам у галузі цивільної безпеки. Використання 3D візуалізації, анімації, звукового супроводу, субтитрування при розробці та формуванні навчального курсу освітніх компонент дозволяє наповнити його необхідним інформаційним змістом, занурюючи студента в реальне виробниче середовище із можливістю відпрацювання аварійних ситуацій, адекватної поведінки у разі виникнення НС, оперативного та правильного прийняття рішень. Використання доповненої реальності дозволяє максимально наблизити навчальний процес та забезпечити необхідні компетенції для реального технологічного процесу та обладнання, що дає можливість здобувачеві швидко адаптуватися на робочому місці. Отримані результати можуть бути використані викладачами та інструкторами для досягнення практичних навичок, компетенцій, зниження рівня помилок, що допускаються серед здобувачів, підвищення якості їх підготовки та ефективності прийнятих оперативних рішень у надзвичайних ситуаціях.

**Ключові слова:** візуалізація, технології навчання, доповнена реальність, віртуальна реальність.

### Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій

Сьогодні основною конкурентною перевагою на ринку праці є наявність у працівників «softskills». Роботодавці вказують на низький рівень міжособистісних, комунікаційних та аналітичних здібностей випускників, що зумовило тривале дистанційне навчання та активний розвиток цифрових технологій [1].

Значна увага при працевлаштуванні приділяється наявності стійких «softskills» компетенцій. Гнучкі (м'які) компетенції «softskills» (в англомовних джерелах про «softskills» можна зустріти термін «employability», іншими словами «employability») на даний момент не мають однозначного трактування в науці, але величезна більшість переконана в тому, що для кар'єрного росту та успіху для них пріоритетнішими є «hardskills» (або професійні знання). Найбільш точними визначеннями «softskills» можна назвати здатність вирішувати складні завдання, зберігати самовладання в стресових ситуаціях, проявляти критичне мислення та креативність. Крім того, «м'які навички» включають в себе компетентність в управлінні людьми, навички координації та взаємодії, емоційний інтелект, здатність судити та приймати рішення, навички ведення переговорів та когнітивну гнучкість, що є вкрай необхідною компетенцією для фахівців з цивільної безпеки, оскільки їх професійна діяльність пов'язана з постійною комунікацією та взаємодією з різними людьми.

### Постановка завдання та його вирішення

Для отримання конкурентоспроможних, успішних, ефективних спеціалістів після закінчення на-

вчання не слід зміщувати акцент виключно на «hardskills», професійні компетенції, на шкоду розвитку «softskills», загальнокультурних та загальнопрофесійних компетенцій. Реалії та ринок праці такі, що відразу після отримання диплому молодий спеціаліст йде на роботу, перш за все з'ясовують, чи є у нього «м'які навички» і, виходячи з їх наявності, беруть його на роботу чи ні. Науковці виділяють два основні шляхи формування «м'яких навичок» у студентів: перший – це навчання безпосередньо, введення окремих курсів у варіативну складову навчального плану. Другий підхід полягає у використанні потенціалу дисциплін, що вивчаються, у поєднанні з неформальною освітою та позааудиторною виховною роботою.

Повний спектр компетентностей, що формують формування майбутнього фахівця у вищому навчальному закладі, складається з комплексу загальнокультурних компетенцій, блоку загальнопрофесійних компетенцій та комплексу професійних компетентностей, які формуються видами діяльності майбутнього фахівця з цивільної безпеки, які, як правило, регламентуються стандартом вищої освіти за спеціальністю. Кожна навчальна дисципліна орієнтована на унікальний перелік розвинутих компетентностей, які мають забезпечити необхідний професійний рівень спеціаліста-початківця до закінчення навчання у закладі вищої освіти (ЗВО).

Незважаючи на всю складність оволодіння та коригування таких навичок, робота з їх формування в процесі професійної підготовки фахівців з цивільної безпеки у ЗВО дозволить привернути увагу студентів до ролі особистісних, міжособистісних і професійних здібностей для здійснення ефективної тру-

дової та професійної діяльності, а також успішне кар'єрне зростання.

Формування «м'яких навичок» має відбуватися як на загальнопрофесійних дисциплінах та міждисциплінарних курсах разом із формуванням загальнопрофесійних компетентностей, так і на дисциплінах загальноосвітнього циклу. Наразі роботодавці віддають перевагу кандидатам, які окрім професійних обов'язкових навичок та компетенцій у сфері цивільної безпеки мають мобільність, системне мислення, мають широкі знання у різних сферах життя та в курсі інноваційних процесів. Особистісні характеристики, які репрезентують унікальні якості студентів та рівень розвитку softskills, відіграють важливу роль не лише у здійсненні професійної діяльності, а й у цілому значно підвищують конкурентоспроможність майбутнього фахівця [1-2].

Результати дослідження показали, що «гнучкі навички» є збірним терміном, який стосується різноманітних форм поведінки, які допомагають людям працювати, а також успішно спілкуватися – взаємодіяти з іншими людьми, навіть якщо ця взаємодія не відбувається віч-на-віч, через Інтернет, телефон або навіть через обробку документів.

У практиці зарубіжних університетів традиційно багато уваги приділяється розвитку softskills. Аналіз інноваційних педагогічних технологій, які використовуються в зарубіжних технічних університетах, показує, що, незважаючи на різноманіття підходів, загальною тенденцією є орієнтація на проблемно-орієнтоване та проектно-організоване навчання з першого курсу. У практиці вітчизняних інженерних вищих навчальних закладів знайомство студентів з науково-проектною діяльністю починається, як правило, на старших курсах. Проектно-організоване навчання командній роботі сприяє розвитку навичок співпраці, а додаткові до звичайних занять професійно орієнтовані заходи: семінари, тренінги, літні тематичні школи, міжнародні проекти – дозволяють на практиці більш інтенсивно та ефективніше формувати необхідні професійні та універсальні компетентності випускників.

Крім вивчення теоретичного матеріалу, освітні компоненти спеціальності 263 Цивільна безпека передбачають проведення практичних, лабораторних робіт, в процесі виконання яких здобувачі набувають практичних навичок з роботи технічних систем, пристроїв, виміральної апаратури, навчаються синтезувати практичні навички з різних дисциплін, а також вчать взаємодіяти у команді, приймати відповідальні рішення, комунікувати за напрямками професійної діяльності.

Не варто недооцінювати такий інструмент розвитку «softskills» і «hardskills», як стажування на підприємствах і в компаніях. Проходження виробничої практики суттєво впливає на підготовку студентів з цивільної безпеки до майбутньої професійної діяльності в цілому: розвиваються не лише професійні навички, а й комунікативні навички. У ході стажування формується професійна етика та розширюється мережа професійних контактів. Проте сучасні вимоги безпеки – бойові дії на території Укра-

їни – не дозволяють повноцінно використовувати цей засіб навчання.

Для студентів спеціальності 263 Цивільна безпека існують свої особливості навчання, які обумовлені необхідністю усвідомленого набуття нових професійних компетенцій відповідно до сучасних актуальних видів діяльності. Проблема здобуття спеціальних знань, умінь, навичок і формування професійних компетенцій та необхідних індивідуальних психологічних якостей майбутнього фахівця, прийняття правильних оперативних рішень в надзвичайних ситуаціях воєнного, виробничого, природного і техногенного характеру набуває особливої значущості особливо у період викликів військової агресії. Фахівці цивільної безпеки повинні володіти широким спектром знань, навичок і умінь з різних освітніх компонент: психології, екології, медицини, теорії горіння і вибухів, охорони природного середовища, ресурсозбереження та інших науках. Практика показує, що підвищення рівня готовності фахівців цивільної безпеки вимагає розробки інтеграційного підходу до навчання у ЗВО.

Порівняльний аналіз показує, що проблема підвищення якості професійного навчання найбільш гостро проявляються в тому, що студенти при змішаному навчанні не в повній мірі готові до застосування здобутих знань. Нерідко, виявляючи гарні теоретичні знання, вони не можуть застосувати ці знання на практиці.

Якісне, повне засвоєння матеріалу освітніх компонент при дистанційному навчанні, дозволяє підготувати фахівців здатних вирішувати на першорядних посадах завдання створення і підтримання здорових та безпечних умов праці, забезпечення цивільного захисту, техногенної безпеки, а також реагування на надзвичайні ситуації та ліквідацію їх наслідків.

До найефективніших інструментів розвитку м'яких навичок, визнаних фахівцями зарубіжних ЗВО, а останнім часом і вітчизняних, слід віднести інтерактивні методи навчання, які передбачають використання технологій доповненої (AR) та віртуальної (VR) реальності [3]. Використання таких технологій забезпечує широкі можливості для організації навчальної мобільності, неупередженості контролю знань, доступності повноцінної освіти для людей з обмеженими можливостями, оптимізації режиму роботи та взаємодії викладачів зі студентами, а також підвищення продуктивності самостійної роботи студентів інженерних спеціальностей. Доповнена реальність постає як інтерактивна технологія, яка дозволяє накладати комп'ютерну графіку або текстову інформацію на об'єкти реального часу. Цю реальність можна розглядати як середовище з прямим чи опосередкованим доповненням фізичного світу цифровими даними в реальному часі за допомогою м пристроїв – планшетів, смартфонів та інноваційних гаджетів, а також програмного забезпечення для них [4]. Ця технологія дозволяє здобувачам керувати об'єктами доповненої реальності, переміщувати їх, обертати, змінювати масштаб та переглядати під різними кутами [5]. Все це веде до розвитку

просторового мислення, дозволяє повніше і глибше сприймати предмет, що вивчається, що особливо важливо для повного розуміння конструкції і принципів роботи дорогого спеціалізованого обладнання і складних технологічних процесів пожежної та паросилової безпеки.

Таким чином, підготовка спеціаліста з цивільної безпеки дозволяє максимально занурити студента в реальний виробничий процес професійної діяльності та дає можливість реалізувати процес навчання з максимальним наповненням візуальним, звуковим та інформаційним наповненням, використовуючи активні методи навчання.

Технології віртуальної реальності дозволяють реалізовувати дистанційні навчальні курси для студентів спеціальності 263 Цивільна безпека, що повною мірою забезпечує формування практичних та аналітичних навичок, які особливо актуальні при дистанційній підготовці таких фахівців, причиною чого стала світова пандемія та проведення бойових дій на території України. Реалізація такого роду курсів сприяє підвищенню інтересу до матеріалу, що вивчається, самостійному навчанню та пізнанню нового, підвищенню якості та ефективності навчання та розвитку «softskills» і «hardskills» за рахунок використання деталізації, стимулюється розвиток просторового мислення, забезпечується інтерактивність процесу навчання; з'являється можливість вивчити великий обсяг інформації за менший час і виникає «ефект несподіванки» для здобувачів, що є важливим елементом навчання сучасної молоді [6].

**Мета дослідження** – визначити можливості технології доповненої та віртуальної реальності у формуванні «softskills» та «hardskills» у студентів-електриків у процесі візуалізації навчального матеріалу та довести її ефективність при організації освітньої складової практичних занять.

Студенти часто відчують значні труднощі при вивченні фізичних процесів і явищ, що відбуваються при вибухових реакціях, горінні та аварійних ситуаціях на виробництві. Це пов'язано з відсутністю можливості візуалізації таких процесів у реальних лабораторних умовах [4-5]. Набуття таких знань і вмінь є фундаментальною основою розуміння природи фізичних явищ і процесів, що формує компетентність фахівця. За допомогою технології віртуальної та доповненої реальності можна продемонструвати поширення таких процесів, що збільшує демонстраційну складову навчального матеріалу. Доповнена та віртуальна реальність створює атмосферу занурення в технологічний процес чи техніко-організаційну задачу та дозволяє за допомогою віртуальних засобів формувати аналітичне мислення студентів для найбільш ефективного вирішення [6-7]. Відмінність технології доповненої реальності від віртуальної полягає в тому, що вона не ізолює здобувача від реального світу, а розширює його, додаючи корисний цифровий контент (звуки, відео, текст, іноземну термінологію, коментарі тощо), тоді як віртуальна реальність перетворює навчання в комп'ютерну гру з повним відтворенням технологічного середовища, в якому перебуває учень.

В основі використання технології доповненої реальності лежить маркерне сканування, яке є переходом від реального навчального демонстраційного матеріалу до віртуально накладених об'єктів, які розширюють і доповнюють основний навчальний матеріал. При цьому маркери доповненої реальності відображаються на екрані електронного пристрою (планшета, телефону) і змінюються залежно від того, які дії виконує учень. Цей метод дозволяє отримати необхідний рівень інтерактивності об'єктів у динамічних процесах. Реалізація доповненої реальності базується на системах просторового відстеження поточного стану об'єкта в просторі, що визначається на основі безперервного аналізу відеопотоку, що надходить від відеокамери цифрового пристрою (гаджета) в реальному часі та доповнюється з AR-сценами [7].

Маркером може бути спеціальне зображення (QR-код або будь-який інший), розміщене як на папері, так і на екранах електронних пристроїв залежно від алгоритмів розпізнавання зображення, можуть використовуватися різні типи зображень. Для використання доповненої реальності не потрібне додаткове обладнання, окрім електронного пристрою, оснащеного камерою та браузером доповненої реальності (рис. 1).



Рис. 1. Технології доповненої реальності в дії

При проведенні практичних занять студентів технологія доповненої реальності дозволяє створювати атмосферу, максимально наближену до реальних умов надзвичайної ситуації чи проблеми, а також дозволяє візуально використовувати інформацію про реальну обстановку із застосуванням типових моделей і методик вирішення оперативних завдань.

Використання навичок віртуальної реальності та віртуальних навчальних курсів вимагає повного відображення технологічного процесу з повним зануренням студента у віртуальне середовище.

Як правило, такий тренажер дозволяє виконувати певні дії з обладнанням (рис. 2, а) і дозволяє імітувати різні аварійні ситуації виробничих процесів (рис. 2, б) і дій оператора, дозволяє швидко реагувати і приймати рішення. Такий підхід вимагає спеціального обладнання, наприклад, окулярів віртуальної реальності.



а



б

**Рис. 2.** Поєднання реальних та віртуальних об'єктів з використанням технологій доповнення та віртуальної реальності на прикладі навчального курсу:

- а) – реалізація віртуального середовища виробничого цеху з можливістю інтерактивного занурення студента;
- б – моделювання аварійних процесів роботи обладнання засобами віртуальної реальності.

Навчання з використанням віртуальної реальності є високоефективним на етапі підготовки спеціаліста для конкретного виробничого процесу та підприємства. Тому велика кількість сучасних підприємств зацікавлені в розробці віртуальних курсів навчання, щоб отримати готового фахівця, який зможе в найкоротші терміни приступити до виконання своїх обов'язків.

Серед таких підприємств – Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат. Враховуючи велику кількість обладнання та складні процеси в його виробничому циклі, навчання молодих спеціалістів на курсах з використанням технологій доповненої та віртуальної реальності майже вдвічі скорочує час адаптації на робочому місці та підвищує ефективність роботи з організації безпекових заходів на таких виробництвах.

Це пов'язано з відсутністю звикання до робочого місця, знайомства з обладнанням та додаткового вивчення його конструкції та функціональності (рис. 3)



**Рис. 3.** Віртуальний тур підприємством

Навчання у віртуальній реальності повністю та реалістично занурює студента у виробниче середовище, як у комп'ютерну гру, дозволяє звикнути до виробничого середовища та того, як тренажер навчає алгоритмам роботи з обладнанням.

Такі віртуальні навчальні курси можуть бути створені за участю роботодавців. В умовах бойових дій, втрат і руйнування матеріально-технічної бази навчальних закладів, неможливості її постійного оновлення через складні економічні умови та враховуючи гостру потребу держави у спеціалістах з цивільної безпеки, прагнення роботодавців до найму на роботу випускників, які добре знають специфіку процесу та технології індивідуального виробництва, така підготовка відповідає потребам у якісному змісті дисциплін для всіх споживачів освітніх послуг. Вибір контенту для відображення та візуалізації у віртуальних навчальних курсах з використанням доповненої та віртуальної реальності дозволяє врахувати побажання всіх зацікавлених сторін. Адаптація та повне занурення у виробниче середовище дозволяє студентам не лише отримати професійні знання, а й спілкуватися, працювати в команді, приймати відповідальні технічні рішення. Це особливо актуально в умовах дистанційного навчання.

Проведені опитування студентів дозволяють стверджувати про ефективність використання таких технологій, оскільки це забезпечує інтерес сучасної молоді до цифрових технологій та дозволяє поєднувати класичне навчання з використанням новітнього підходу.

У своїх коментарях щодо використання запропонованими технологіями студенти звернули особливу увагу на те, що такий підхід дозволяє навчатися в будь-який час, повторюючи практичні дії стільки разів, скільки необхідно для детального вивчення та розуміння конкретного навчального матеріалу.

У зв'язку з комп'ютеризацією світу в цілому та переходом на дистанційне навчання підрастаюче покоління втрачає навички спілкування та роботи в команді, що часто стає причиною сором'язливості та безініціативності під час навчання, що призводить до значних прогалин у знаннях. Таким чином, як зазначають самі студенти, використання сучасних підходів у віртуальних практичних курсах дозволяє уникнути невпевненості через страх неправильних дій, що в свою чергу значно мінімізує психологічне навантаження.

## Висновки

Використання сучасних засобів навчання, набуття жорстких і м'яких навичок є невід'ємним процесом підготовки висококваліфікованих, конкурентоспроможних і психологічно адаптованих до реального виробництва фахівців з цивільної безпеки. Найбільш перспективним напрямком є розвиток навчальних курсів з використанням технологій доповненої та віртуальної реальності.

В сучасних умовах військової агресії в комбінованих тренуваннях технології доповненої та віртуальної реальності можуть бути використані для візуального відтворення роботи техніки в реальних робочих умовах, моделювання надзвичайних ситуацій, а також демонстрації структур і процесів, що відбуваються в складних технологічних комплексах. та сформувані повне уявлення студента про технологічний процес, у якому відбуватиметься його подальша діяльність.

Важливою умовою впровадження технологій віртуальної та доповненої реальності є технічна

можливість впровадження та доступу до них, розробки та формування навчального контенту, забезпечення необхідними пристроями, програмами, браузерами, можливість дотримання умов та методів роботи з ними.

Попереднє дослідження ефективності застосування технологій доповненої та віртуальної реальності в дистанційному навчанні студентів-електриків у формуванні твердих і м'яких навичок та їх опитування підтвердили доцільність його впровадження.

Перспективними напрямками подальших досліджень є впровадження технологій віртуальної та доповненої реальності в організацію практикумів в умовах дистанційного навчання в навчальних закладах різного рівня, а також у системах підготовки та перепідготовки кадрів на підприємствах.

**Подяка авторів.** Автори висловлюють подяку адміністрації Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського за можливість проведення дослідження.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. M. Akcayir, G. Akcayir, «Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature». *Educational Research Review*. 20, 1–11, 2017.
2. Joachim Scholz, Andrew Smith Augmented Reality: Designing Immersive Experiences That Maximize Consumer Engagement *Business Horizons* 59(2):149-161 · March 2016 DOI: 10.1016/j.bushor.2015.10.003
3. О. Ю. Чубукова, І. В. Пономаренко, «Інноваційні технології доповненої реальності для викладання дисциплін у вищих навчальних закладах України». *Проблеми інноваційно-інвестиційного розвитку*. № 16. с. 20-27, 2018.
4. X. Zhang, "The College English Teaching Reform Supported by Multimedia Teaching Technology and Immersive Virtual Reality Technology," 2019 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS), 2019, pp. 77-80, doi: 10.1109/ICVRIS.2019.00028.
5. Poyasok, T., Chenchevoi, V., Bespartochna, O., Chencheva, O. Application of the Augmented Reality Technology to Training Future Electrical Engineers *Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice, PAEP 2020, 2020, 9240788*
6. Chencheva, O., Chenchevoi, V., Herasymenko, L., Bespartochna, E., Shmeleva, A., Kolysnychenko, I. *Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2021, 2021*
7. Н. М. Задерей, І. Ю. Мельник, Г. Д. Нефьодова «Сучасні підходи до STEM-навчання в університетській освіті». *Scientific Journal "Virtus" Issue # 5, February, p. 152 – 155. 2016.*

Received (Надійшла) 19.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.11.2022

## Application of technologies supplemented and virtual reality for acquiring hard and soft skills in the training of civil security specialists

Olga Chencheva, Volodymyr Chenchevoi, Volodymyr Bakharev, Mykhailo Lytvynenko, Evgen Lashko, Serhiy Gerashchenko

**Abstract. Purpose.** Analysis of the possibility of using augmented and virtual reality technologies to create distance online courses in order to ensure the acquisition of "hard" and "soft skills" of civil security specialists in the conditions of distance learning caused by combat operations. **Subject.** Systematization of methods and principles of using technologies of augmented and virtual reality in the process of training applicants for the specialty 263 Civil security in conditions of mixed education. The article examines the problems of acquiring hard skills and soft skills by students during distance learning. The factors that form communicative and professional skills are determined. The problems of the formation of the content of professional training, the selection of forms and methods of working with applicants for the purpose of effective training in the competencies and skills necessary for professional activity in the field of civil security are substantiated. The use of 3D visualization, animation, sound accompaniment, subtitling in the development and formation of the training course of educational components allows you to fill it with the necessary informational content, immersing the student in a real production environment with the opportunity to practice emergency situations, adequate behavior in the event of an emergency, prompt and correct decision-making. The use of augmented reality makes it possible to bring the educational process as close as possible and provide the necessary competencies for the real technological process and equipment, which enables the student to quickly adapt to the workplace. The obtained results can be used by teachers and instructors to achieve practical skills, competencies, reduce the level of mistakes made among applicants, improve the quality of their training and the effectiveness of operational decisions in emergency situations.

**Keywords:** visualization, learning technologies, augmented reality, virtual reality.

В. М. Почерняєв<sup>1</sup>, М. С. Магомедова<sup>2</sup>, Н. М. Сивкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Одеса, Україна

<sup>2</sup> Київський фаховий коледж зв'язку, Київ, Україна

## ФАЗО-ЧАСТОТНИЙ ПРИСТРІЙ НА ЧАСТКОВО ЗАПОВНЕНОМУ ДІЕЛЕКТРИКОМ ПРЯМОКУТНОМУ ХВИЛЕВОДІ

**Анотація.** У статті розглянуто зменшення величини втрат потужності у фазо-частотному пристрої на частково заповненому діелектриком прямокутному хвилеводі, на шляху забезпечення сталості відношення фаз в піддіапазонах частот при зміні тільки співвідношення амплітуд. У роботі наведено конструкцію фазо-частотного пристрою на частково заповненому діелектриком прямокутному хвилеводі із застосуванням спрямованих відгалужувачів. Показано якісний характер розподілу амплітуд сигналів у піддіапазонах частот  $p_1$  та  $p_2$  залежно від фази  $\beta$ . Побудовані залежності ККД від фазового зсуву для різних значень перехідного ослаблення двоелементного направленої відгалужувача на частково заповненому діелектриком прямокутному хвилеводі і амплітуд на середній частоті. Розраховано мінімальну величину ослаблення відбитої хвилі, що потрапляє на вхід  $p_2$  при подачі сигналу на вхід  $p_1$  залежно від величини частотної розстройки. Наведено формулу для перехідного ослаблення двоелементного направленої відгалужувача на частково заповненому діелектриком прямокутному хвилеводі. Розглянуто схему складання сигналів в антенно-фідерному тракті, в якому використовується попереднє розгалуження сигналів з постійним фазовим співвідношенням.

**Ключові слова:** фазо-частотний пристрій, мобільна цифрова тропосферно-радіорелейна станція, частково заповнений діелектриком прямокутний хвилевід, щілинний міст, спрямований відгалужувач.

### Вступ

У надзвичайних ситуаціях виникає потреба в мобільних цифрових станціях НВЧ, що швидко розгортаються та здатні одночасно встановлювати прямі зв'язки і організовувати прив'язки до стаціонарних вузлів зв'язку. Для цих цілей розроблено мобільну цифрову тропосферно-радіорелейну станцію (МЦТрРРС) [1]. Така станція можлива до застосування в районах стихійних лих та катастроф, в умовах гористості та важкопрохідної місцевості, а також у зоні військового конфлікту та бойових дій. У таких комбінованих станціях НВЧ виникає завдання частотного ущільнення антенно-фідерного тракту, що пов'язане з забезпеченням широкосмугості цих трактів.

Широкосмуговими антенно-фідерними трактами в діапазоні НВЧ є тракти на частково заповнених діелектриком прямокутних хвилеводах (ЧЗДПХ) [2]. Робота у кількох піддіапазонах частот зазвичай здійснюється шляхом використання частотних фільтрів НВЧ в антенно-фідерних трактах станцій. При малих інтервалах частот між робочими смугами піддіапазонів, що використовуються, зростають втрати у фільтрах. Якщо застосовувати замість частотних фільтрів НВЧ фазо-частотні пристрої, втрати потужності будуть визначатися ставленням робочої смуги частот до рознесення середніх частот використовуваних піддіапазонів.

**Метою роботи** є зменшення величини втрат потужності у фазо-частотному пристрої на ЧЗДПХ на шляху забезпечення сталості відношення фаз в піддіапазонах частот при зміні тільки співвідношення амплітуд.

**Аналіз досліджень.** Фазо-частотний пристрій на ЧЗДПХ може бути застосований при реалізації

пристроїв для яких важлива постійність відношення фаз [3, 7]. Такий пристрій може бути використаний при проведенні вимірювання фазо-частотних характеристик різних видів ґрунтів та визначення імпедансу ґрунту, як показано в роботі [4]. Також можливе застосування такого пристрою при дослідженні фазових зсувів та їх характеристик позиціонування у багаточастотній та множинній глобальній навігаційній супутниковій системі з кількома сферами [5]. Ще одним способом застосування такого пристрою може бути використання пристроїв НВЧ при визначенні місця ушкодження лінії електропередачі постійного струму високої напруги [6].

### Основна частина

В роботі наведено фазо-частотний пристрій (рис. 1), що складається з двох щілинних мостів ЦМ1 і ЦМ2, з'єднаних між собою лініями передачі різної довжини  $l_1$  та  $l_2$  і реалізованих на ЧЗДПХ.

Як видно з рис. 1, лінія передачі  $l_2$  складається з трьох відрізків рівномірно вигнутих у площині  $H$  ЧЗДПХ  $-l_{в1}, l_{в2}, l_{в3}$ . Розрахунок щілинного мосту та рівномірно вигнутих ЧЗДПХ наведено в роботі [2, §8.2 та §5.3 відповідно]. Величина втрат потужності на узгодженні навантаження визначається так:

$$P_{\text{вн}}/P_{\text{вх } p_1} = \sin^2 \frac{\pi(l_2-l_1)}{\Lambda}, \quad (1)$$

де  $\Lambda$  – довжина хвилі в ЧЗДПХ.

З формули (1) випливає, що величина втрат зростає із зростанням відношення

$$\frac{\Delta f_{p1}}{2(f_{p2}-f_{p1})},$$

оскільки

$$\frac{l_2-l_1}{\Lambda} = \frac{\Delta f_{p1}}{2(f_{p2}-f_{p1})}.$$

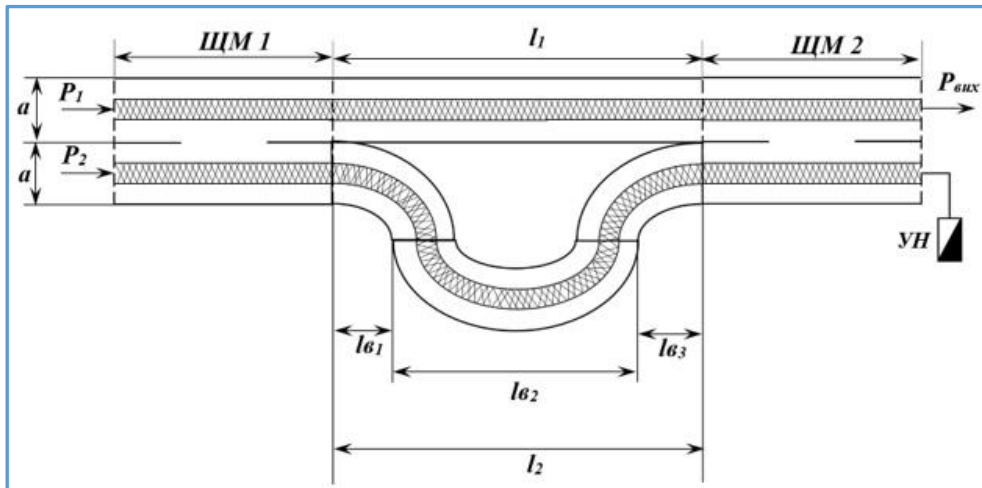


Рис. 1. Фазо-частотний пристрій

Наприклад, це суттєво для антенно-фідерних трактів мобільних цифрових тропосферних станцій та комбінованих МЦТрРРС, де два піддіпазони частот ~4,4 ... 4,65 ГГц та ~4,65 ... 4,9 ГГц розміщуються в смузі частот 4,4 ... 4,9 ГГц.

На рис. 2 наведена конструкція фазо-частотного пристрою на ЧЗДПХ із застосуванням спрямованих відгалужувачів.

Спрямовані відгалужувачі НВ1 та НВ2 мають однакові коефіцієнти відгалуження (перехідне осла-

блення) та з'єднані між собою двома ЧЗДПХ довжиною  $l$ .

Сигнали  $P_1$  та  $P_2$  надходять у НВ3 по ЧЗДПХ рівної довжини ( $l_{в4} + l_{о1} = l_{в5} + l_{о2}$ ).

На рис. 3 показаний якісний характер розподілу амплітуд сигналів ( $E$ ) у піддіпазонах частот  $\pi 1$  та  $\pi 2$  в залежності від фази  $\beta l$ . У смузі частот  $2\Delta f_{\pi 1}$  сигнали, що надходять із входу 1, мають приблизно однакові амплітуди і такий фазовий зсув, при якому сигнали складаються і надходять на вихід НВ3.

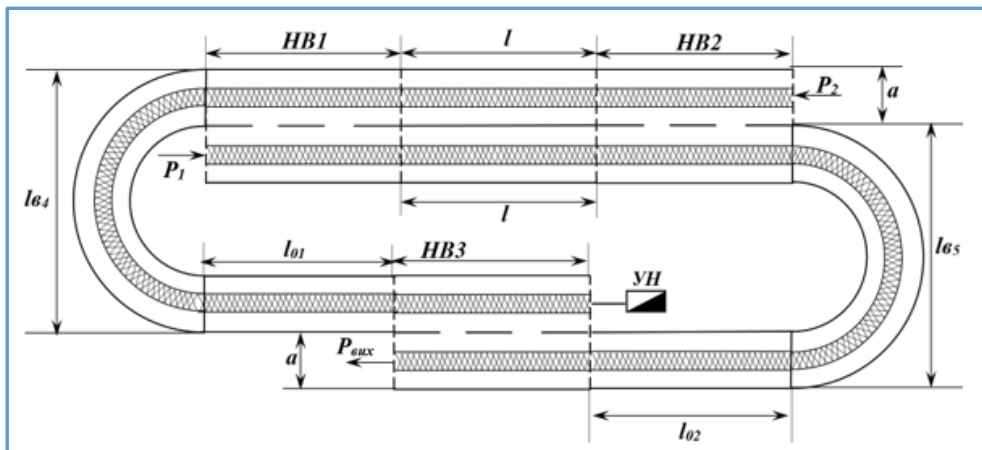


Рис. 2. Конструкція фазо-частотного пристрою на ЧЗДПХ

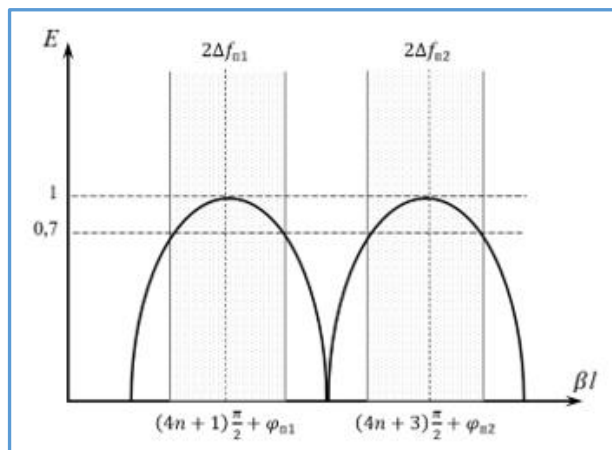


Рис. 3. Якісний характер розподілу амплітуд сигналів

У смузі частот  $2\Delta f_{\pi 2}$  такі ж умови мають місце для сигналів, що надходять зі входу 2. Коефіцієнт корисної дії (ККД) фазо-частотного пристрою наступний:

$$ККД_{\pi 1} = P_{н} / P_{вх \pi 1}, \quad ККД_{\pi 2} = P_{н} / P_{вх \pi 2}.$$

На рис. 4 побудовані залежності ККД від фазового зсуву для різних значень перехідного ослаблення двоелементного направлено відгалужувача на ЧЗДПХ і амплітуд на середній частоті. Розрахункова формула для перехідного ослаблення двоелементного направлено відгалужувача на ЧЗДПХ наступна [2, §8.3] ( $\chi_{h10}$ ,  $\beta_{h10}$  – поперечні та поздовжні хвильові числа хвилі квазі -  $H_{10}$  на ЧЗДПХ відповідно;  $\chi_{h20}$  – поперечне хвильове число хвилі квазі -  $H_{20}$  на ЧЗДПХ;  $a$  – широка стінка хвильоводу):

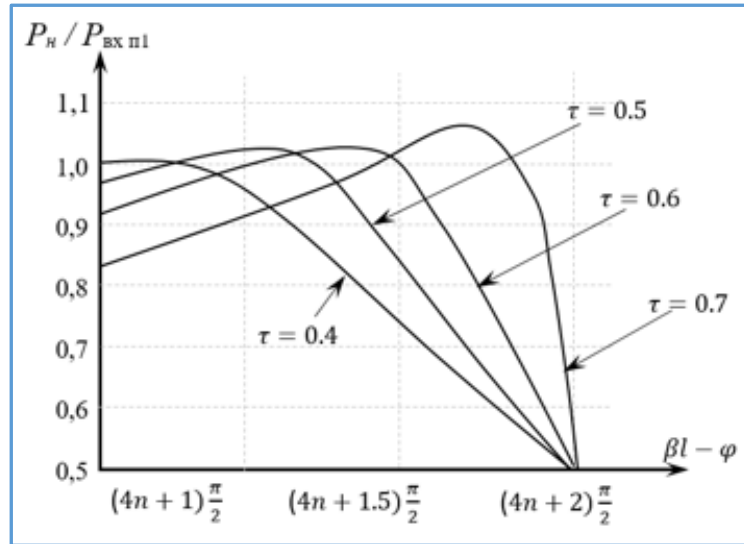


Рис. 4. Залежність ККД від фазового зсуву

$$\tau = \left\{ \sin^2 2\beta_{h10} l \left( K_2 \frac{\chi_{h10}}{\chi_{h20}} + K_1 \right)^2 \left[ \sin^2 2\beta_{h10} l \left( K_2 \frac{\chi_{h10}}{\chi_{h20}} + K_1 \right)^2 - 2L_1 \right] + L_1^2 \left[ L_1^2 + 4\sin^2 2\beta_{h10} l \left( K_2 \frac{\chi_{h10}}{\chi_{h20}} + K_1 \right) \right] \right\}^{-\frac{1}{2}},$$

$$K_1 = \left[ \frac{2\pi^2}{\beta_{h10} a} \sqrt{\frac{2l}{a}} / (\pi^2 - (2\beta_{h10} l)^2) \right] / y_{11},$$

$$K_2 = \left[ \frac{4\pi^2}{\beta_{h10} a} \sqrt{\frac{2l}{a}} / (4\pi^2 - (2\beta_{h10} l)^2) \right] / y_{22},$$

$$L_1 = K_1 (1 + \cos 2\beta_{h10} l) - K_2 \frac{\chi_{h10}}{\chi_{h10}} (1 - \cos 2\beta_{h10} l),$$

$$L_2 = K_1 (1 + \cos 2\beta_{h10} l) + K_2 \frac{\chi_{h10}}{\chi_{h10}} (1 - \cos 2\beta_{h10} l),$$

$$y_{11} = \frac{2}{\beta_{h10} a} \left[ \operatorname{ctg} \pi t 1 - \frac{1}{\pi W_1} + \frac{\pi^2}{l^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\chi_{m0}^2 (1 - e^{-j2\beta_{h10} l})}{2\beta_{m0} l (\beta_{m0}^2 + (\frac{\pi}{2l})^2)^2} \right],$$

$$y_{22} = \frac{2}{\beta_{h10} a} \left[ \operatorname{ctg} \pi t 2 - \frac{1}{\pi W_2} + \frac{\pi^2}{l^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\chi_{m0}^2 (1 - e^{-j2\beta_{h10} l})}{2\beta_{m0} l (\beta_{m0}^2 + (\frac{\pi}{2l})^2)^2} \right],$$

$$W_1 = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_{\text{эф}} - \left(\frac{\pi}{2l}\right)^2} / \left(\frac{\pi}{a}\right), \quad W_2 = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_{\text{эф}} - \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} / \left(\frac{2\pi}{a}\right).$$

Значимо, що на середній частоті  $f_{0п1}$  втрати дорівнюють нулю і зростають із розладкою (різко нелінійно при  $\beta l - \varphi = (2n + 1)\pi$ ). Це значення відповідає розладці по частоті, що дорівнює половині рознесення середніх частот сигналів, що складаються. Зі зростанням перехідного ослаблення  $\tau = 0,5 \dots 0,7$  графіки мають провали на середній частоті.

Важливий параметр системи додавання сигналів - величина розв'язки між їх джерелами. Схема рис. 2 забезпечує повну розв'язку входів п1 і п2 при ідеальних відгалужувачах і відсутності відбитків від навантаження.

При неповному узгодженні навантаження відбиті сигнали, повертаючись у схему, діляться між входами п1 і п2 у тому співвідношенні, у якому ділиться прямий сигнал між виходом і узгоджуваль-

ним навантаженням. Мінімальною величиною ослаблення відбитої хвилі, що потрапляє на вхід п2 при подачі сигналу на вхід п1 є величина  $\mathcal{L}$ .

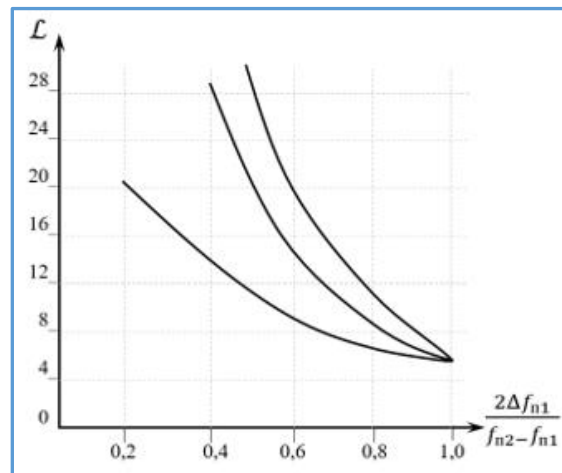
Розраховані криві зміни  $\mathcal{L}$  в залежності від частотної розладки  $\frac{2\Delta f_{п1}}{f_{п2} - f_{п1}}$  наведено на рис. 5. У схемі рис. 2 мінімальна розв'язка по відбитій хвилі виходить досить високою:

при  $2\Delta f_{п1} = 0,5 (f_{п2} - f_{п1})$  - величина  $\mathcal{L} = 23\text{дБ}$ .

Розрахунок описаної схеми зводиться до визначення довжини з'єднувальних ліній  $l$  і величини коефіцієнтів відгалуження у відгалужувачах НВ1 і НВ2 за заданими середніми частотами  $f_{п1}, f_{п2}$  сигналів і робочими смугами пропускання

$$2\Delta f_{п1} = 2\Delta f_{п2} = 2\Delta f.$$



Рис. 4. Розраховані криві зміни  $\mathcal{L}$ 

Відповідно до рис. 3 довжина сполучних ліній повинна задовольняти наступним співвідношенням:

$$\begin{aligned} (2n + 0,5)\pi + \varphi_{n1} &= 2\pi\beta_{n1}l \\ (2n + 1,5)\pi + \varphi_{n2} &= 2\pi\beta_{n2}l' \end{aligned}$$

де  $\varphi_{n1}, \varphi_{n2}$  - фазові зрушення у відгалужувачах у лініях  $l$  для частот  $f_{n1}$  та  $f_{n2}$ ;  $n$  - ціле число.

### Висновки

Режим роботи фазо-частотного пристрою має максимально плоску амплітудно-частотну характе-

ристику з найбільшою розв'язкою між входами на центральних частотах.

Максимальну розв'язку між входами можна забезпечити поблизу центральних частот робочих смуг піддіапазонів.

Розглянута схема складання сигналів (рис. 2) антено-фідерного тракту, в якій використовується попереднє розгалуження сигналів з постійним фазовим співвідношенням, має невелику зміну співвідношення амплітуд.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Патент №112217 Україна. С2. Мобільна цифров тропосферно-радіорелейна станція / Почерняєв В.М., Повхліб В.С.; заявл. 12.09.2014; опубл. 10.08.2016 // Бюл.№ 15.
2. Почерняєв В.Н. Устройства на частично заполненных диэлектриком волноводах. – Киев: УКНИПСК, 2000. – 224с.
3. Sotner R., Jerabek J., Langhammer L., Polak L., Jaikla W., Prommee P. Operational Frequency Bandwidth Rescalable Implementations of Constant Phase Devices // 29th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), Pardubice, Czech Republic, 16-18 April 2019. - pp.1-6.
4. Xiaobin Cao, Zhongmei Li, Shiwei Yao. Analysis on the Phase Frequency Characteristic of Soil Impedance // Energy and Power Engineerin, 2018. - Vol.10. - No.04. - 8p.
5. Tianjun Liu, Hua Chen, Qusen Chen, Weiping Jiang, Denis Laurichesse, Xiangdong An & Tao Geng. Characteristics of phase bias from CNES and its application in multi-frequency and multi-GNSS precise point positioning with ambiguity resolution // GPS Solut 25, 58 (2021).
6. Congshan Li, Ping He. Fault-location method for HVDC transmission lines based on phase frequency characteristics // IET Generation, Transmission & Distribution, 2018. – Volume 12. - №4. - pp.912-916.
7. Meifang Cai. Optimization Algorithm and Realization of the Phase Frequency Characteristics of Passive Network / 6th International Conference on Electronic, Mechanical, Information and Management, 2016. – pp. 1190-1193.

Received (Надійшла) 19.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.11.2022

### Phase-frequency device on a rectangular waveguide partially filled by dielectric

V. Pochernyaev, M. Mahomedova, N. Syvkova

**Annotation.** The article considers a decrease in the magnitude of power losses in a phase-frequency device on a rectangular waveguide partially filled by dielectric on the way to ensuring the constancy of the phase ratio for both frequency subranges when only the amplitude ratio changes. The paper presents the design of a phase-frequency device based on a rectangular waveguide partially filled by dielectric using directional couplers. The qualitative nature of the distribution of signal amplitudes in the frequency subranges 1 and 2 depending on the phase  $\beta l$  is shown. The dependences of the efficiency on the phase shift for various values of the transient attenuation of a two-element directional coupler on a rectangular waveguide partially filled by dielectric and amplitudes at the middle frequency are plotted. The minimum value of the attenuation of the reflected wave that enters the input  $n_2$  when a signal is applied to the input  $n_1$  is calculated depending on the magnitude of the frequency detuning. A formula is proposed for the transient attenuation of a two-element directional coupler on a rectangular waveguide partially filled by dielectric. The scheme of signal addition in the antenna-feeder path, which uses a preliminary branching of signals with a constant phase ratio, is considered.

**Keywords:** phase-frequency device, mobile digital troposcatter – radiorelay station, rectangular waveguide partially filled by dielectric, slotted bridge, directional coupler.

Р. М. Царьков, Н. В. Єрмілова

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

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЗА ОЗНАКОВИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СИГНАЛІВ

**Анотація.** З аналізу останніх досліджень і публікацій авторами виявлено, що усі практичні реалізації синтезаторів частоти з фазовим автопідстроюванням (ФАПЧ) страждають від небажаних частотних компонентів, і оскільки ці компоненти значною мірою впливають на продуктивність системи, постає задача їх передбачення та мінімізації. У статті розглядається принципи роботи дільника опорної частоти  $Q$ , дільника у петлі зворотного зв'язку  $P$  та дільника вихідної частоти  $N$  на ФАПЧ, їх вплив на роботу системи. Представлена блок-схема ФАПЧ з однією вихідною частотою. Продемонстрований псевдокод алгоритму пошуку найоптимальніших характеристик системи. Проілюстрована робота алгоритму на прикладі синтезування вихідної частоти 50 МГц за опорним сигналом, в якості котрого використана звичайна частота відеосигналу. Детально розглянуті основні параметри системи, а саме споживання, частота запуску та встановлення, тремтіння, фазовий шум, розглянуті взаємозв'язки їх меж. Визначено, що споживання визначається частотою генератора, керованою напругою (ГКН), струмом підкачування заряду і параметрами дільників частоти. У більшості ГКН для досягнення вищих частот потрібні великі струми, це означає, що із зростанням частоти збільшується енергоспоживання. Час запуску та встановлення для ФАПЧ визначається власною частотою петлі, цей параметр вважають показником швидкості зміни частоти ФАПЧ. Встановлено, що для мінімізації часу запуску та встановлення необхідно збільшити коефіцієнт підсилення ГКН та струм підкачування, а коефіцієнт поділу в контурі зворотного зв'язку та ємність фільтра, навпаки, встановити у мінімальне значення. Також в роботі визначено, що чим нижче коефіцієнт підсилення ГКН, тим менш чутлива схема ФАПЧ до дрейфу напруги фільтра. Авторами виявлено, що для зменшення фазового шуму зручно скористатися вихідним коефіцієнтом поділу дільника  $N$ . Встановлено, що при використанні малошумного вихідного дільника фазовий шум можна зменшити за рахунок збільшення частоти роботи ГКН і збільшення коефіцієнта поділу вихідної частоти  $N$ . Наведено приклади використання конфігурацій.

**Ключові слова:** фазове автопідстроювання, генератор, фазовий шум, оптимізація.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Синтезатори частоти з її фазовим автопідстроюванням (ФАПЧ) завдяки своїй здатності генерувати стабільну та програмовану вихідну частоту є в більшості сучасних систем телекомунікації. Усі практичні реалізації ФАПЧ страждають від небажаних частотних компонентів, таких як фазовий шум і паразитні тони, і оскільки ці компоненти впливають на продуктивність системи, їх необхідно передбачити та мінімізувати.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботах авторів [1-5] піднімаються питання причин погіршення якості вихідного сигналу та приводяться методи рішення цих проблем. Області роботи варіюються від загальних моделей до конкретних рішень для покращення сигналу при передачі даних через систему 5G.

З аналізу робіт можливо зробити висновок, що підвищення точності функціонування фазового автопідстроювання було й буде актуальним до поки є потреба у передачі даних по телекомунікаційним системам.

**Мета роботи** – огляд методів підвищення точності функціонування ФАПЧ в телекомунікаційних системах за допомогою оптимізації їх параметрів.

### Основна частина

Призначення синтезатора частоти полягає в генерації потрібної вихідної частоти на основі заданої частоти опорного сигналу. При цьому зв'язок між вхідною і необхідною вихідною частотою не завжди

очевидний. Від коефіцієнтів поділу в петлі ФАПЧ залежить рівень шуму та рівень споживання схеми. У деяких випадках питання вибору оптимальних значень є одним із найважливіших, особливо коли наявне обладнання вже не відповідає новим вимогам.

Потрібно відзначити, що кожен елемент ФАПЧ має непрямий вплив на якість вихідного сигналу, тож буде логічним зауважити, що без оптимізації системи не можливо отримати якомога точніший вихідний сигнал.

Розглянемо типову архітектуру ФАПЧ з одною вихідною частотою та принципи її роботи, та оптимізації нижче.

Синтезатор частоти генерує вихідний сигнал на основі частоти опорного сигналу:

$$f_{\text{вих}} = k * f_{\text{опорн}}, \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт поділу частоти (нормований множник), у цій статті буде розглядатися лише цілочислові значення  $k$ .

Коефіцієнт поділу  $k$  формується за допомогою декількох дільників, встановлених у схемі ФАПЧ (рис. 1). У загальному випадку використовуються три блоки дільників: дільник опорної частоти ( $Q$ ), дільник у петлі зворотного зв'язку ( $P$ ) та дільник вихідної частоти ( $N$ ). Коефіцієнт  $k$  для цього типу синтезатора частоти визначається так:

$$k = \frac{P}{QN}, \quad (2)$$

З рівнянь (1) і (2) отримуємо співвідношення між вхідною та вихідною частотами:

$$f_{\text{вих}} = \frac{P}{QN} f_{\text{опорн}} \quad (3)$$

Показана на рис. 1 блок-схема ФАПЧ спрощується, якщо коефіцієнти  $N$  чи  $Q$  рівні одиниці. Якщо ж обидва коефіцієнти будуть рівними одиниці, синтезатор може генерувати тільки частоти, кратні опорної.

В такому випадку значення  $P$  визначається простим арифметичним співвідношенням. Якщо один з коефіцієнтів  $Q$  або  $N$  дорівнює одиниці, то для синтезу бажаної частоти потрібно підібрати відповідну конфігурацію, що визначається співвідношенням  $Q/P$  чи  $N/P$ .

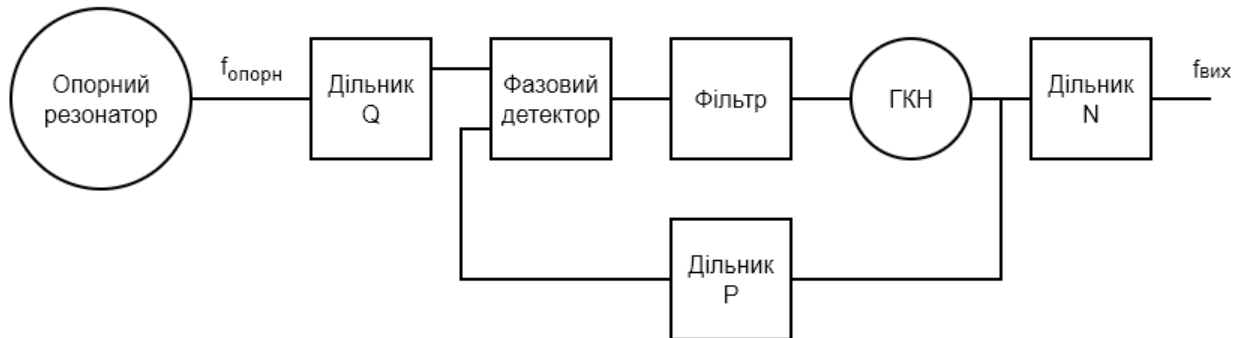


Рис. 1. Блок-схема ФАПЧ (ГКН – генератор, керований напругою)

Перепишемо формулу (3) так, щоб усі відомі величини були у правій частині рівняння, а невідомі – у лівій:

$$\frac{P}{QN} = \frac{f_{\text{вих}}}{f_{\text{опорн}}} \quad (4)$$

Отже, ми отримали рівняння з трьома невідомими. Зазвичай рішення знаходиться шляхом перебору різних поєднань  $P$ ,  $Q$  та  $N$ , які дають необхідну частоту. Для відображення роботи цього алгоритму перебору нижче представлений псевдокод:

```

FOR n = Nmin; n < Nmax; n++
  FOR q = Qmin; q < Qmax; q++
    IF p / (q * n) == fout / fref THEN
      CALL: Save (p, q, n)
    ELSE
      countinue
  ENDFOR
ENDFOR

```

Цей псевдокод відображає лише математичну реалізацію алгоритму без урахування додаткових вимог, що дозволяють отримати лише здійсненні на практиці конфігурації.

Для ілюстрації роботи алгоритму розглянемо приклад. Нехай слід синтезувати вихідну частоту 50 МГц за опорним сигналом 14,3181818 МГц (звичайна частота відеосигналу). Припустимо, ГКН має частотний діапазон 100...400 МГц. Використовуючи алгоритм пошуку, отримуємо результати, подані в табл. 1. Це список усіх можливих вимог конфігурацій, які будуть задовольняти дану систему. Тепер із них необхідно вибрати кращий варіант.

Використання всіх трьох дільників частоти дозволяє задавати вихідну частоту контуру ФАПЧ програмно. З іншого боку, в цьому випадку складніше знаходити потрібні значення  $P$ ,  $Q$  і  $N$  – одна й та сама вихідна частота може бути отримана за допомогою різних поєднань. При цьому інші характеристики контуру ФАПЧ, такі як споживання, час запуску, тремтіння і фазовий шум, будуть сильно відрізнятись.

Варто відзначити, що не всі ФАПЧ мають доступ до дільників  $Q$ ,  $P$ ,  $N$ . В деяких випадках для збільшення продуктивності системи кращим рішенням буде заміна компонентів кола з більш доречною до ситуації архітектурою.

Коли список всіх конфігурацій, які відповідають вимогам частоти, визначений, слід приступити до вибору найоптимальнішої. Універсальної оптимальної конфігурації немає, вона залежить від додатку. Для віддаленої станції моніторингу, наприклад, може знадобитися швидкий запуск, але не потрібна висока точність.

Для протоколу зв'язку, навпаки, не має значення час запуску та енергоспоживання, проте потрібне джерело частоти з дуже низьким тремтінням. У випадках, коли під час збору даних важливим є лише швидке пробудження, а під час передачі даних необхідна висока точність, можуть мати значення обидві ці характеристики. Застосування програмованих ФАПЧ дозволяє реалізувати будь-які вимоги та достатньо правильно вибрати конфігурацію.

Розглянемо деякі загальні параметри ФАПЧ, оптимізовані для різних програм. Список цих параметрів наведено в таблиці 2. Потрібно зауважити, що не у всіх програмованих ФАПЧ є можливість доступу до всіх параметрів цього списку.

- Споживання визначається частотою ГКН, струмом підкачування заряду і параметрами дільників частоти. У більшості ГКН для досягнення вищих частот потрібні великі струми. Це означає, що із зростанням частоти збільшується енергоспоживання. Генератор підкачування розряджається раз на цикл фазового детектора (ФД). При великому струмі підкачування заряду збільшується енергія, що витрачається за період ФД. Найбільше споживання припадає на початок такту. При великих значеннях коефіцієнтів розподілу потрібно більше дільників, що також призводить до збільшення споживаної потужності.

Таблиця 1 – Результати обрахунків

N	$F_{\text{опори}}$ , МГц	$f_{\text{ГКН}}$ , МГц	$F_{\text{вих}}$ , МГц	$f_{\text{ФД}}$ , МГц	Q	P
2	14,318..	100	50	0,227	63	440
3	14,318..	150	50	0,682	21	220
4	14,318..	200	50	0,227	63	880
5	14,318..	250	50	0,227	63	1100
6	14,318..	300	50	0,682	21	440
7	14,318..	350	50	1,591	9	220
8	14,318..	400	50	0,227	63	1760

Таблиця 2 – Список параметрів та способів їх оптимізації

Параметр	Ключові параметри системи	Оптимізація
Споживання	Частота ГКН ( $f_{\text{ГКН}}$ ) Частота фазового детектора ( $f_{\text{ФД}}$ ) Тон генератора підкачки заряду ( $I_{\text{ГПЗ}}$ ) Коефіцієнти ділення (P, Q, N)	Мінімізувати $f_{\text{ГКН}}$ Мінімізувати $f_{\text{ФД}}$ Мінімізувати $I_{\text{ГПЗ}}$ Мінімізувати P, Q, N
Час вмикання та час установки	Частота фазового детектора ( $f_{\text{ФД}}$ ) Струм генератора підкачки заряду ( $I_{\text{ГПЗ}}$ ) Ємність фільтра (C) Коефіцієнт підсилення ГКН ( $K_{\text{ГКН}}$ )	Максимізувати $f_{\text{ФД}}$ Максимізувати $I_{\text{ГПЗ}}$ Мінімізувати C Максимізувати $K_{\text{ГКН}}$
Тремтіння (між циклами)	Частота фазового детектора ( $f_{\text{ФД}}$ ) Ємність фільтра (C) Коефіцієнт підсилення ГКН ( $K_{\text{ГКН}}$ )	Максимізувати $f_{\text{ФД}}$ Максимізувати C Мінімізувати $K_{\text{ГКН}}$
Фазовий шум	Полоса частот при замкнутому контурі зворотного зв'язку Фазовий шум елементів ФАПЧ Коефіцієнт ділення вихідного сигналу (N)	Максимізувати $f_{\text{ГКН}}$ Максимізувати N Використовувати полосу для зниження шуму опорного резонатора та ГКН

• Час запуску та встановлення для ФАПЧ визначається власною частотою петлі. Цей параметр можна вважати показником швидкості зміни частоти ФАПЧ. Він характеризує, як швидко може змінюватися частота вихідного сигналу ФАПЧ. Час запуску пропорційний підсиленню ГКН і струму підкачування заряду і обернено пропорційний ємності фільтра та коефіцієнту поділу в контурі зворотного зв'язку. Таким чином, для мінімізації часу запуску та встановлення необхідно збільшити коефіцієнт підсилення ГКН та струм підкачування, а коефіцієнт поділу в контурі зворотного зв'язку та ємність фільтра, навпаки, встановити у мінімальне значення.

• Основний вплив на тремтіння системи здійснюють частота фазового детектора та коефіцієнт підсилення ГКН. При вищій частоті ФД напруга контуру ФАПЧ оновлюється з вищою швидкістю. Це запобігає виникненню дрейфу напруги в ланцюзі. При використанні фільтра з великою ємністю рівень тремтіння напруги за період ФД стає мінімальним. Оскільки коефіцієнт підсилення ГКН визначає, наскільки сильно змінюється напруга вихідного сигналу по відношенню до зміни напруги на фільтрі, то чим нижче коефіцієнт підсилення

ГКН, тим менш чутлива схема ФАПЧ до дрейфу напруги фільтра.

• Зазвичай фазовий шум, що вноситься опорним резонатором, зменшується шляхом встановлення ФАПЧ близько до нижньої межі частот. Фазові шуми, що вносяться ГКН, навпаки, пригнічуються шляхом встановлення частоти ФАПЧ ближче до верхньої межі смуги. Для зменшення фазового шуму зручно скористатися вихідним коефіцієнтом поділу N. Фазовий шум ділиться пропорційно до коефіцієнта вихідного дільника. Якщо використовується малошумний вихідний дільник, фазовий шум можна зменшити за рахунок збільшення частоти роботи ГКН і збільшення коефіцієнта поділу вихідної частоти N.

Якщо побудова системи з низьким енергоспоживанням є головним завданням проектування, слід знизити частоту ГКН і значення коефіцієнтів дільників. Тому поєднання  $N = 3$ ,  $Q = 21$ ,  $P = 220$  (табл. 1) є найкращим вибором. ГКН працює на низьких частотах, коефіцієнти P та Q мають невисокі значення, а частота ФД має прийнятне значення.

Якщо ж потрібно розробити пристрій з мінімальним часом вмикання та встановлення, то найбільш відповідною є конфігурація  $N = 7$ ,  $Q = 9$ ,  $P = 220$ . За

рахунок високої частоти ФД забезпечується досить висока частота оновлення напруги фільтра.

Щоб отримати схему з низьким тремтінням, оптимальним буде використання набору коефіцієнтів  $N = 7$ ,  $Q = 9$ ,  $P = 220$ . У цій конфігурації частота ФД більш ніж удвічі вища, ніж за інших. В результаті частота відновлення напруги фільтра підвищується. Відповідно, схема має найменше тремтіння. Відмінність оптимізації за тремтінням від оптимізації за часом запуску полягає в тому, що для отримання малощумливої схеми повинні бути обрані малі значення ємності та коефіцієнта підсилення ГКН.

## Висновки

1. Проведений аналіз джерел показує, що пошук методів підвищення точності для фазового автопідстроювання був і залишається актуальним нині та у майбутньому.

2. Проаналізований вплив дільників опорної частоти  $Q$ , зворотного зв'язку  $P$  та вихідної частоти  $N$  на ФАПЧ, їх роль у процесі роботи системи. Наведений псевдокод алгоритму пошуку дільників при визначених параметрах опорної та вихідної частоти. Приведений приклад, в якому потрібно знайти оптимальну конфігурацію при вихідній частоті 50 МГц, опорним сигналом 14,3181818 МГц, також припускається, що ГКН має частотний діапазон 100...400 МГц.

Результати приведені в табл. 1.

3. Більш детально розглянуті загальні параметри ФАПЧ, а саме споживання, час вмикання та установки, тремтіння та фаховий шум. Розглянуті взаємозв'язки їх меж. Для кожного з параметрів описано спосіб його оптимізації за рахунок інших параметрів системи. Наведено приклади по одному з параметрів, які підходять для реалізації конкретних цілей.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bakic D., Wu J. Pll For Mmwave 5g / Daniel Bakic, Jinzhao Wu // Lund UniversityLund University Publications. – Department Of Electrical And Information Technology Lund University – 2020. – P. 5-10.
2. Collins I. Phase-Locked Loop (PLL) Fundamentals [Електронний ресурс] / Ian Collins // AnalogDialogue – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-52/number-3/phase-locked-loop-pll-fundamentals.pdf>
3. Jonsson F. Design and Calibration of Integrated PLL Frequency Synthesizers / Fredrik Jonsson // Digitala Vetenskapliga Arkivet. – Royal Institute of Technology – 2008. – P. 84-87.
4. Zhibin Luo Jicheng Ding and Lin Zhao Adaptive Gain Control Method of a Phase-Locked Loop for GNSS Carrier Signal Tracking [Електронний ресурс] / Zhibin Luo Jicheng Ding and Lin Zhao // Hindawi. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2018/6841285/>
5. Mentze E. Understanding the basics of PLL frequency synthesis [Електронний ресурс] / Erik Mentze // PLANET ANALOG. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.planetanalog.com/understanding-the-basics-of-pll-frequency-synthesis/>

Received (Надійшла) 26.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.11.2022

## Increasing the accuracy of functioning of phase-locked loop according to the indicative characteristics of signals

R. Tsarkov, N.Yermilova

**Abstract.** From the analysis of recent research and publications by the authors, it is found that all practical implementations of phase-locked frequency synthesizers (PLLs) suffer from unwanted frequency components, and since these components significantly affect the performance of the system, the task of their prediction and minimization arises. The article considers the principles of operation of the reference frequency divider  $Q$ , the divider in the feedback loop  $P$  and the output frequency divider  $N$  on the PLL, their influence on the system operation. A block diagram of a PLL with one output frequency is presented. The pseudocode of the algorithm for finding the most optimal system characteristics is demonstrated. The work of the algorithm is illustrated on the example of synthesizing the output frequency of 50 MHz based on the reference signal, which uses the usual frequency of the video signal. The main parameters of the system are considered in detail, namely consumption, startup and settling frequency, jitter, phase noise, and the relationships between their limits are considered. It was determined that the consumption is determined by the frequency of the voltage-controlled oscillator (VCO), the charge pumping current and the parameters of the frequency dividers. In most VCOs, high currents are required to achieve higher frequencies, which means that power consumption increases with increasing frequency. The startup and settling time for a PLL is determined by the natural frequency of the loop, this parameter is considered an indicator of the rate of change of the PLL frequency. It was established that in order to minimize the time of startup and settling, it is necessary to increase the gain factor of the VCO and the pumping current, and the separation factor in the feedback circuit and the capacity of the filter, on the contrary, should be set to the minimum value. It is also determined in the work that the lower the gain factor of the VCO, the less sensitive the PLL circuit is to the drift of the filter voltage. The authors found that it is convenient to use the original division factor of the divider  $N$  to reduce phase noise. It was established that when using a low-noise output divider, the phase noise can be reduced by increasing the frequency of operation of the VCO and increasing the division coefficient of the output frequency  $N$ . Examples of the use of configurations are given.

**Keywords:** phase-locked loop, oscillator, phase noise, optimization

## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Абдусалам Х. І. С.	51	Ісай Д. А.	66	Пасічник А. В.	91
Аль-Амморі Алі	51	Канарський Є. О.	79	Перекрест А. Л.	57
Бараненко Р.	88	Капітон А.	88	Подорожняк А. О.	45
Бахарєв В. С.	153	Кльон А. М.	42	Почерняєв В. М.	158
Башенко Д. В.	108	Козлов В. Є.	91	Руденко О.	114
Бельорін-Еррера О. М.	117	Козлов Ю. В.	91	Серебряннікова В. Ю.	22
Білокінь О.	114	Кулягін А. І.	94	Сивкова Н. М.	158
Бірук Я. І.	138	Кучук Г. А.	94	Скакаліна О.	88
Бурдейна Н. Б.	138	Кучук Н. Г.	100	Скоробогатько С. В.	145
Вадурін К. О.	57	Лаппо І. М.	45	Стадник А. О.	79
Васюхно С.І.	104	Лашко Є. Є.	153	Тарасенко М. В.	32
Гапон А. І.	32	Левченко О. В.	4	Ткачов В. М.	94
Герашенко С. М.	153	Лещенко В. М.	28	Толочин М. О.	71
Глива В. А.	142	Литвиненко М. Ю.	153	Трет'як А. В.	42
Головко Г. В.	66, 71	Магомедова М. С.	158	Фесенко Г. В.	145
Гученко М. І.	57	Мезенцев М. В.	36	Філоненко А. М.	117
Денисенко М. А.	28, 32	Мелешко Є. В.	108	Царьков Р. М.	162
Дехтяр М. М.	51	Микусь С. А.	104	Ченчева О. О.	153
Дмитрієв С.О.	16	Молчанов Г. І.	117	Ченчевой В. В.	153
Дреєва Г. М.	75	Морозова О. І.	127	Червотока О. В.	45
Євсіна Н. О.	28, 32	Мосольд М. І.	108	Чередніков О. М.	45
Єрмілова Н. В.	162	Мураховська О. А.	10	Шефер О. В.	122
Заліський М.Ю.	16	Нарожний В. В.	94	Шиман А. П.	100
Заполовський М. Й.	36	Нікітченко Є.	122	Щеглов В. Р.	127
Землянська О. В.	142	Окоро О. Ч.	16	Якименко М. С.	108
Зуєв А. О.	28, 32	Орехов О. О.	79		
Ільчук О. С.	142	Осіпчук А.О.	16		

Наукове видання

## СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Збірник наукових праць

Випуск 4 (70)

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. Львіна*

Свідectво про державну реєстрацію КВ № 19512-93/2ПР від 16.11.2012 р.

Підписано до друку 07.12.2022. Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 20,75. Тираж 120 прим. Зам. 1207-22  
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 друкарні ФОП Петров В.В.  
Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.  
Запис № 2480000000106167 від 08.01.2009.

61144, м. Харків, вул. Гв. Широнінців, 79в, к. 137, тел. (057) 778-60-34  
e-mail: [bookfabrik@mail.ua](mailto:bookfabrik@mail.ua)