

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 3 (65)

Issue 3 (65)

## 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 = 81.37),  
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 3 вересня 2021 року № 2).*

*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 • 2021

## 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, доц., 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*);  
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*);  
ПАВЛЕНКО Максим Анатолійович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);  
ПИСАРЧУК Олексій Олександрович  
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);  
ПОДКОПАЄВ Сергій Вікторович  
(*д-р техн. наук, проф., Покровськ, Україна*);  
СЕМЕНОВ Сергій Геннадійович  
(*д-р техн. наук, проф., 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., Харків, 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, доц., 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.), Ass. 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*);  
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*);  
Maksim PAVLENKO  
(*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., Kharkiv, Ukraine*);  
Yevhen FROLOV  
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Poltava, Ukraine*);  
Oleksii CHORNYI  
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Kremenichuk, Ukraine*).

### Responsible secretary:

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

### Technical secretary:

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

# З М І С Т

## НАВІГАЦІЯ ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

<i>Нестеренко С. В., Єрмоленко Д. А., Шефер О. В., Клепко А. В.</i> Українська навігаційна супутникова система: стан і перспективи .....	4
<i>Пащенко Р. Е., Марюшко М. В.</i> Моніторинг змін стану сільськогосподарських земель за даними фрактального аналізу космічних знімків .....	8

## АВТОМОБІЛЬНИЙ, РІЧКОВИЙ, МОРСЬКИЙ ТА АВІАЦІЙНИЙ ТРАНСПОРТ

<i>Верховський В. В., Захарченко І. В., Тарасов Р. В.</i> Розробка моделі навчаємого для автоматизованої системи керування тренажерною підготовкою пілотів цивільної авіації .....	18
<i>Дакі О. А., Урум Н. С., Федунів В. М., Бажак О. В.</i> Методи морехідної астрономії в сучасності .....	24
<i>Мажара І. П.</i> Метод прийняття рішення з формування потоків літаків для заходу на посадку з використанням нечітких нейромережових технологій .....	28
<i>Табуненко В. О., Марценяк О. П., Кужелович В. І.</i> Удосконалення системи організації обліку дорожньо-транспортних пригод у підрозділах, військових частинах і з'єднаннях Національної Гвардії України .....	33
<i>Шапіро Г. В., Аросланкін О. О., Постніков Є. С.</i> Формування інформаційної моделі надводної обстановки для автоматизації процесів судноводіння .....	37

## УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

<i>Лютенко В. С., Мاستюх В. О.</i> Математична модель віброгасителя .....	42
<i>Makogon H., Babkin Yu., Bakanov K., Moskalenko V., Mosiychuk M., Piskun S.</i> Proposals for improvement of logistic support of state defense forces unit through a visual graphic representation of the situation and the application of the operation research mathematical models .....	46
<i>Масягін В. І., Григоренко А. М., Конох К. М., Хахалкіна О. А.</i> Визначення факторів, які знижують показники надійності дисків ГТД та розробка заходів по їх підвищенню .....	50
<i>Носков В. І., Блиндюк В. С., Скородєлов В. В., Гейко Г. В.</i> Перевірка і налаштування параметрів тягового електроприводу у стаціонарних режимах .....	56
<i>Павленко М. А., Каліновський Д. О.</i> Аналіз методів та моделей прийняття рішень на управління частинами зенітних ракетних військ та тактичної авіації .....	60

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Бідюк П. І., Гуць С. В., Гавриленко В. В., Рудоман Н. В.</i> Прогнозування цін акцій з використанням рекурентної нейронної мережі LSTM .....	64
<i>Вайсала С.Ю., Цьона Н. В.</i> Підвищення точності розпізнавання обігових монет за рахунок використання згорткової нейронної мережі з декількома виходами .....	69
<i>Волк М. О., Гора М. В., Демчук В. Г., Ольшанська Т. І., Ткаленко О. В.</i> Модифікований метод самовідновлення програмних систем з використанням дампу пам'яті .....	74
<i>Golovko G., Pokhodun V.</i> Analysis and software implementation of modular multiplication-based block cipher .....	78
<i>Євсєєв С. П., Хвостенко В. С., Бондаренко К. О.</i> Розробка комплексного показника якості обслуговування на основі постквантових алгоритмів .....	82
<i>Kapiton A., Baranenko R., Tyshchenko D., Diachenko O.</i> Prospects for the cyberspace development and its socio-psychological consequences .....	89
<i>Кучук Н. Г., Шиман А. П., Філоненко А. М., Бульба С. С.</i> Розрахунок ефективності використання обчислювальних ресурсів самовідновлювальної комп'ютерної системи .....	92
<i>Maslov A., Dzuban O., Derkach T., Dmytrenko T.</i> Operational aspects of Web-applications development based on Javascript framework .....	96
<i>Піскачов О. І., Піскачова І. В., Ткаченко В. П.</i> Вибір матеріалу тари для зберігання мікрофільмів методом аналізу ієрархій .....	99
<i>Simhayev A. S., Derkach T. M., Dmytrenko T. A.</i> Video and audio content are effective components of social network development .....	103
<i>Skakalina E.</i> Synthesis trends of forecasting using inductive modeling methods .....	108

## ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

<i>Alyoshin S., Haitan O., Zyua O.</i> The constructive implementation of Liebig's law of the minimum in the paradigm of synthesis of a neural network subject state classifier .....	113
<i>Волошкіна О. С., Ковальова А. В.</i> Виробничий ризик для безпеки працюючих на відкритому повітрі від температурних умов навколишнього середовища .....	118
<i>Глива В. А., Матвєєва І. В., Зозуля Л. А., Зозуля С. В.</i> Дослідження захисних властивостей залізовмісного композиту для екранування рентгенівських випромінювань .....	123
<i>Панова О. В.</i> Застосування електромагнітних екранів у комплексі заходів з нормалізації рівнів фізичних факторів середовища .....	126

## ЗВ'ЯЗОК, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА

<i>Іохов О. Ю., Малюк В. Г., Каплун С. О.</i> Обґрунтування основних технічних вимог до засобів знешкодження радіокерованих боєприпасів .....	130
<i>Князєв В. В., Кравченко В. І., Лазуренко Б. О., Серков О. А., Трубочанінова К. А.</i> Методи забезпечення електромагнітної сумісності мобільних телекомунікаційних систем зв'язку .....	134
<i>Sakovych L., Gnatiuk S., Voloshko S., Miroshnichenko Yu.</i> Research of conditional diagnostic algorithms many source objects ..	139
<i>Ткачов В. М., Коваленко А. А., Фесенко Т. Г.</i> Оптимізація мережного алгоритму функціонування комп'ютерних мереж підвищеної живучості на мобільній платформі на етапі їх проектування .....	143
<b>АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК</b> .....	148

# Навігація та геоінформаційні системи

УДК 528.2:629.78

doi: 10.26906/SUNZ.2021.3.004

С. В. Нестеренко, Д. А. Єрмоленко, О. В. Шефер, А. В. Клепко

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

## УКРАЇНСЬКА НАВІГАЦІЙНА СУПУТНИКОВА СИСТЕМА: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ

**Анотація.** Проаналізовані основні діючі і перспективні навігаційні супутникові системи світу, у тому числі й регіональні, за точністю позиціонування, зоною покриття, кількістю виведених на орбіту космічних апаратів, активністю оновлення системи тощо. Відмічено, що, залежно від програмування, усі вищезазначені навігаційні системи є взаємосумісними і можуть функціонально доповнювати одне одного. Додатково підвищити точність позиціонування можливо з використанням глобальних систем диференційних поправок SBAS (Space Based Augmentation System) у Північній і Південній Америці, в Європі і Японії, а для корекції GPS-даних на території України використовуються методи коригування DGPS і RTK з наземних базових станцій. Досліджено можливості української космічної галузі. Проаналізована затверджена Концепція Державної космічної програми, яка передбачає запуск супутника «Січ-2-30» з терміном експлуатації 5 років, і подальше щорічне його доповнення кількома супутниками упродовж п'яти років. Попри позитивні зрушення в українській космічній галузі виявлені недоліки і проблеми її повноцінного розвитку: недостатнє фінансове забезпечення, нестійке правове державне регулювання, необхідність довготривалих наукових досліджень для оцінки рівня якості позиціонування. Супутник «Січ-2-30» не зможе забезпечити Україні повну інформаційну незалежність, а, отже, і фінансову незалежність від інших постачальників картографічних знімків, так як отримувати знімки будуть мати відносно невисоку роздільну здатність. Відмічено, що незважаючи на проблемні питання, є гостра необхідність розвитку власної української навігаційної системи для отримання цифрових зображень поверхні Землі. У держави з'явиться можливість проведення постійного безперервного моніторингу різних явищ, галузей, секторів, таких як землевпорядних, аграрних, екологічних, архітектурно-будівельних, економічного прогнозування, кліматичних, правоохоронних, військових тощо. Завдяки ефективній роботі української навігаційної супутникової системи з'явиться можливість брати участь у різних міжнародних програмах, зокрема з освоєння Місяця, повноцінно інтегруватися у Європейську космічну систему, що передбачає Угода про асоціацію України з ЄС.

**Ключові слова:** навігаційні супутникові системи, точність позиціонування, зона покриття, моніторинг.

### Вступ

**Постановка проблеми.** В травні 2020 року було оприлюднено проєкт постанови Кабінету Міністрів України «Про внесення змін до Порядку побудови Державної геодезичної мережі», згідно якого «складовими Державної геодезичної мережі, крім геодезичної (планової) і нівелірної (висотної) мереж, є українська постійнодіюча (перманентна) мережа спостережень глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС)» [1]. Відомо, що на сьогодні Українська мережа перманентних ГНСС-станцій налічує трохи більше сотні станцій, з яких менше десяти входять до Європейської перманентної мережі GPS-станцій EPN та Міжнародної мережі IGS [2]. Україна має можливість отримувати дані з 21-го супутника інших країн, зокрема ЄС. На жаль, послуги платні. Наразі постало проблемне питання щодо відновлення робіт по запуску українського супутника дистанційного зондування Землі «Січ-2-1» («Січ-2-30»).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженнями розвитку глобальних навігаційних супутникових систем, технологій супутникової навігації займалися багато вітчизняних та зарубіжних науковців, таких як: Грей Джим, Дж. Розенау, В. В. Дик, Н. Хомські, Г. Р. Громов, Ю. А. Соловьев, А. И. Гусев, В. Гондюл, І. Забара та інші. Їхні праці посідають важливе місце у сучасній теорії й практиці, дозволяють усвідомити надзвичайну актуальність, необхідність проведення наступних теоретич-

них і практичних досліджень, зокрема для розвитку космічної галузі в Україні.

**Мета статті** – дослідити можливості української космічної галузі, проаналізувати необхідність створення власної навігаційної системи для отримання цифрових зображень поверхні Землі, а також для моніторингу явищ на території України.

### Виклад основного матеріалу

ГНСС представляє собою систему супутникової навігації, створену з метою позиціонування об'єктів, визначення швидкості й напрямку їх руху. На даний час близько 200 організацій, які займаються збором ГНСС-даних з базових станцій по всьому світу, об'єднані в IGS (International GNSS Service), яка, в свою чергу, входить до Міжнародної асоціації геодезії.

Основні діючі і перспективні навігаційні супутникові системи, в тому числі й регіональні: GPS (США), ГЛОНАСС (Росія), GALILEO (Євросоюз), BeiDou (Китай), QZSS (Японія), NavIC (Індія). GPS (Global Positioning System) – американська глобальна навігаційна супутникова система, основне призначення якої на сьогодні – забезпечення навігаційною інформацією військових і цивільних споживачів. Дозволяє в режимі реального часу в будь-якому місці Землі, в різних погодних умовах визначати місцезнаходження і швидкість об'єктів. За областю застосування GPS-приймачі поділяють на побутові (навігаційні), автономна точність позиціонування

яких не перевищує 3-5 м, і професійні. Професійні GPS–приймачі, в свою чергу, можна розділити на приймачі для картографії і ГІС, геодезичні системи і спеціальні (GPS–модулі, з яких створюються вбудовані системи навігації для транспортних засобів або системи синхронізації для підприємств енергетики, мобільного зв'язку, радіо і телебачення) [3]. Американська супутникова система створила кілька поколінь супутників. Розрахунковий термін служби перших навігаційних апаратів становив 5-12 років. Термін роботи супутників третього покоління GPS III, який функціонує з 2018 року, збільшений до 15 років. За допомогою GPS III можна визначити місцезнаходження з точністю до 1-3 м для цивільних користувачів (можливості супутників другого покоління – від 3 м до 10 м). Крім того, апарат останнього покоління має підвищену завадостійкість. Для повноцінної роботи навігаційної системи необхідно мати як мінімум 24 діючих супутника. Всього на навколосеземну орбіту успішно виведені 74 супутника. В даний час (з урахуванням запуску 6 листопада 2020 року) на орбіті Землі знаходяться 33 супутника, з них 31 апарат передає навігаційні сигнали.

Принцип роботи російської навігаційної супутникової система ГЛОНАСС подібний до системи навігації NAVSTAR GPS: пропонує навігаційні сигнали стандартної і високої точності для забезпечення позиціонування і отримання сигналів часу, які були б доступними для усіх цивільних споживачів ГЛОНАСС по всьому світу на постійній основі. На сьогодні система налічує 28 супутників, з них 23 – працюють за призначенням. У жовтні 2020 року відбувся запуск космічного апарату нового покоління «Глонасс-К». На сьогодні основу орбітального групування системи становлять космічні апарати «Глонасс-М». Заміна орбітального групування на «Глонасс-К» дозволить збільшити гарантійний термін експлуатації до 10 років, а точність – до десятків сантиметрів. ГЛОНАСС забезпечує більш точне позиціонування в північних широтах, а GPS – у середніх.

Глобальна навігаційна супутникова система GALILEO створена Європейським Союзом у взаємодії з Європейським космічним агентством для забезпечення незалежності країн членів в сфері координатно-часового та навігаційного забезпечення. Експериментальні супутники GIOVE-A і GIOVE-B були запуснені на орбіту 28 грудня 2005 року і 27 квітня 2008 року відповідно.

Основне завдання GIOVE-A полягало в оцінці точностних характеристик навігаційних радіосигналів GALILEO у всіх частотних діапазонах, а GIOVE-B – в тестуванні навігаційного корисного навантаження. Два перших навігаційних космічних апарати (КА) були запуснені 20 жовтня 2011 року.

Протягом чотирьох років на орбіті було виведено 22 космічних апарати (заплановано 30 КА). GALILEO забезпечує хороше покриття на широтах до 75° північної широти, точність позиціонування може сягати 1 м [6].

Китай завершив формування навігаційної системи «BeiDou», запустивши у космос 23 червня 2020

року супутник системи Бейдоу-3, який став останнім в орбітальному угрупованні власної системи навігації КНР. За допомогою BeiDou можна визначити розташування об'єктів в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні з точністю до 10 см.

Система «BeiDou» розроблена за принципом сумісності із зарубіжними аналогами. Клієнти усього світу зможуть користуватися чотирма супутниками з кращими сигналами навігації спільно або незалежно один від одного. В даний час система «BeiDou» встановила механізм співпраці з GPS, ГЛОНАСС і GALILEO для сприяння взаємозв'язку та забезпечення послуг. Згідно з даними китайських ЗМІ, в даний час більше 120 країн користується сервісами, що базуються на даних, отриманих за допомогою «BeiDou», включаючи відстеження руху суден в портах і боротьбу з наслідками стихійних лих.

Японська квазізенітна супутникова система QZSS (регіональна) призначена для обслуговування споживачів в Тихоокеанському–Азіатському регіонах. Перший космічний апарат Michibiki був успішно запуснен на навколосеземну орбіту у вересні 2010 року. Останній запуск четвертого супутника був здійснений у 2017 році. Система QZSS працює у взаємодії з GPS. Космічні апарати Michibiki посилають сигнали на однакових частотах з GPS, тому супутники американської і японської навігаційних систем використовують як єдине супутникове угруповання, що дає можливість стабільно здійснювати визначення координат з високою точністю. Крім того, враховуючи особливість системи QZSS постійного розташування одного із супутників майже в зеніті над Японським архіпелагом, в крупних містах з щільною міською забудовою похибка вимірювань буде зменшена до дециметрової точності. До того ж треба відмітити, що система квазізенітних супутників може бути використана в якості заміни GPS. QZSS має важливе значення з точки зору забезпечення безпеки і для Японії, і для США [5].

У травні 2006 року Індія затвердила програму створення системи регіональної навігаційної супутникової системи IRNSS, яка повинна забезпечити автономне навігаційно-тимчасове забезпечення на Індійському півострові. Перший навігаційний космічний апарат IRNSS-1a було запуснено 8 липня 2013 року. Формування штатної орбітального угруповання з 7 космічних апаратів було закінчено в 2016 році. Тоді ж система й отримала нову назву – NavIC.

Система NavIC надає споживачам з одночастотною апаратурою іоносферні поправки на основі параметрів іоносферної точкової сітки, забезпечуючи тим самим точність визначення місця розташування споживача, яку можна порівняти з точністю, одержуваною при використанні двочастотної апаратури.

Основні характеристики навігаційних супутникових систем світу зведено у табл. 1. Цікаво, що, залежно від програмування, усі вищезазвані навігаційні системи є взаємосумісними і можуть функціонально доповнювати одне одного. Підвищення точності позиціонування досягається використанням

глобальних систем диференційних поправок SBAS (Space Based Augmentation System), що можна дослівно перекласти, як «космічні допоміжні системи»:

WAAS (сигнали доступні в Північній і Південній Америці), EGNOS (у Європі), MSAS і QZSS (у Японії).

Таблиця 1.- Характеристика навігаційних супутникових систем світу

ГНСС-системи	Розпочато створення системи, рік	Виведено на орбіту супутників (працюють за призначенням)	Дата останнього запуску супутника	Точність позиціонування, м	Зона покриття
GPS (США)	1973	33 (31)	06.11.2020 р.	≈ 2,0	Навколоземний простір
ГЛОНАСС (Росія)	1982	28 (23)	25.10.2020 р.	≈ 3,0	Навколоземний простір
GALILEO (Євросоюз)	1994	22 (18)	17.12.2015 р.	≈ 4,0	Навколоземний простір
BeiDou (Китай)	1994	45 (39)	23.06.2020 р.	≈ 3,0	Навколоземний простір
QZSS (Японія)	2002	4 (4)	09.10.2017 р.	≈ 0,5	Японія, райони Південно-Східної Азії, Австралія
NavIC (Індія)	2006	8 (7)	31.08.2017.р.	≈ 10,0	Індійський півострів

Для корекції GPS-даних на території України використовуються методи коригування DGPS і RTK з наземних базових станцій. Диференціальний режим DGPS забезпечує дециметрову точність (1 – 3 м) визначення місцерозташування об'єкту. Цей метод є достатньо простим і економічним, так як в роботі застосовуються одночастотні антени. Для високоточної координати, знаходження планових координат і висот точок топографічної поверхні із сантиметровою точністю використовується режим RTK. Для роботи в режимі RTK необхідні двочастотні антени, які дають можливість картографування ділянок території з геодезичною точністю на всій території покриття мережі RTK.

Використання методів корекції отриманих даних DGPS і RTK є досить ефективним у високоякісному обладнанні і професійному програмному забезпеченні [4]. Основним недоліком є те, що отримання поправок у реальному часі – це платні послуги.

Проаналізувавши діючі навігаційні системи, бачимо, що кожна з цих навігаційних систем має свою історію становлення і всевітнього визнання, яка підкріплена довготривалістю наукових досліджень і водночас значними фінансовими вкладеннями. Український супутник дистанційного зондування Землі «Січ-2-1» можна називати космічним довгобудом, бо роботу над ним почали ще у 2013 році, щоб запустити в космос у 2017 році, проте за браком фінансування запуск космічного апарату було відкладено.

В останнє Україна запускала свій супутник «Січ-2» на своїй ракеті-носії «Дніпро» з російського космодрому в 2011 році. Запуск космічного апарату був присвячений 20-річчю Незалежності України. Замість запланованих 5 років супутник через втрату енергопостачання пробув на орбіті лише 16 місяців.

Супутник «Січ-2-30» є модифікацією «Січ-2-1», також вироблений у Дніпрі в КБ «Південне». Він має бути запущений на честь 30-річчя Незалежності України ймовірно в грудні 2021 року за допомогою ракети Falcon 9 компанії Ілона Маска «SpaceX». За даними Державного космічного агентства України стан готовності супутника становить 75 %. Готовність наземних станцій, які будуть керувати ним та

приймати, обробляти інформацію – 35 %. Супутник повністю зібраний, проводяться електричні випробування функціонування його систем.

Згідно з підрахунками Державного космічного агентства, для запуску українського супутника необхідно не менше 140 млн гривень (лише послуги «SpaceX» можуть обійтися в 1 млн доларів). Перемовини з компанією Ілона Маска тривають з кінця минулого року. Наразі обговорюються технічні моменти, бо супутник «Січ-2-1» був розроблений для запуску на іншій ракеті [7].

На сьогодні затверджена лише Концепція Державної космічної програми, яка передбачає, що супутник «Січ-2-30» з терміном експлуатації 5 років буде доповнений кількома супутниками. Їх слід запускати майже щороку. Очікують на ухвалення найближчим часом Державної космічної програми, яка гарантує галузі майже 3 млрд гривень щорічного фінансування упродовж п'яти років.

Запуск українського супутника – це шлях до часткової інформаційної незалежності, дозволить заощаджувати чималі кошти на космічних знімках. З'явиться можливість отримувати більш точну інформацію про те, що відбувається в Криму, в Чорному і Азовському морях, на кордонах з Росією, Білорусією і на окупованих територіях. Можна здійснювати аналіз екологічних проблем цих територій: затоплення шахт на території Донбасу, просідання житлових районів (наприклад, м. Суходільськ Луганської області, рівень просідань ґрунтів – 29 см/рік).

Керувати супутником і обробляти інформацію з нього буде Національний центр управління та випробування космічних засобів, який підпорядкований Державному космічному агентству. Проте супутник «Січ-2-30» не зможе забезпечити Україні повну інформаційну незалежність. Знімки з інших космічних апаратів задля військових цілей доведеться купувати і надалі. «Січ-2-30» має роздільну здатність знімків 8 м. Якщо його дані порівняти зі знімками, знятими іноземними супутниками з роздільною здатністю 50-70 см, то зрозуміло, що «Січ-2-30» передаватиме менш детальну інформацію. На отриманих фото об'єкти величиною з літак матимуть вигляд крапок. Тому «Січ-2-30» можна назвати оглядовим супутником. На його дані дуже чекають,

зокрема, у міністерствах та відомствах, які на тлі земельної реформи мають звірити дані земельного кадастру з супутниковими знімками. Уряд матиме можливість перевірити і те, чи дотримуються великі заводи екологічних норм, як працює аграрний сектор: наприклад, скільки полів дійсно засіяно; робити економічні прогнози і прогнози щодо зміни клімату. Можна відслідковувати надмірні опади у північній частині України і значну посуху у південних її регіонах.

Правоохоронці та рятувальники теж хочуть мати оперативний доступ до супутникових знімків, щоб мати можливість зупинити контрабандистів на суші і на морі, знати, де почалися лісові пожежі, аби вчасно їх гасити, щоб володіти повною інформацією щодо масштабів повеней. Міністерство довіклля теж буде співпрацювати з Державним космічним агентством, щоб в майбутньому мати змогу моніторити вирубки лісу, вчасно реагувати на незаконні рубки, відстежувати стан водойм та забруднення повітря, здійснювати моніторинг надр (виявлення незакон-

них копанок, кар'єрів, незаконних сміттєзвалищ, забудову прибережно-захисних смуг).

### Висновки

Ринок космічних послуг стрімко розвивається. Україна, на думку голови Асоціації «Космос», має всі шанси стати серйозним гравцем на ньому, брати участь у різних міжнародних програмах, зокрема з освоєння Місяця, повноцінно інтегруватися у Європейську космічну систему, що передбачає Угода про асоціацію України з ЄС. Це дозволить іншим галузям економіки отримати замовлення і створити нові робочі місця. Також це відкриває двері для іноземних інвестицій в український космос.

У нас є наземні станції спостереження, наземні станції прийому і обробки супутникової інформації з будь-якого супутника: і українського, й іноземного. Є можливість показати ефективність роботи наземних станцій. Вони можуть бути включені в європейську інфраструктуру і співпрацювати з наземними станціями ЄС.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Проект постанови Кабінету Міністрів України «Про внесення змін до Порядку побудови Державної геодезичної мережі» від 18.05.2020 / Міністерство розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України разом із Державною службою України з питань геодезії, картографії та кадастру [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://land.gov.ua/info/>
2. Павлик В.Г., Кутний А.М., Нестеренко С.В. Визначення локальних вертикальних рухів перманентної GPS – станції у Полтаві / В. Г. Павлик, А. М. Кутний, С. В. Нестеренко; XIII Міжнародна науково-практична конференція «Академічна й університетська наука: результати та перспективи», НУПП, 10-11.12.2020. – Полтава, 2020. – С. 141–145.
3. Система глобального позиціонування GPS. ООО «ЕКОМ» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.ecomgeo.com/contacts.htm>
4. Методи корекції геоанних. Leica Geosystems [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ngc.com.ua/info/correction.htm>
5. Спутники японської системи позиціонування «Митибіки»: прорив в майбутнє. Nippon.com: Современный взгляд на Японию [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nippon.com/ru/currents/d00354/>
6. Холодюк О. В. Глобальні навігаційні супутникові системи та їх роль у технологіях точного землеробства / О.В. Холодюк; Техніка, енергетика, транспорт АПК. – Вінниця, 2020. – № 2 (109). – С. 71–87.
7. Підгола Ю. Відновимо присутність України у навігоземному просторі, 2021 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://suspline.media>.

Received (Надійшла) 23.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.08.2021

### Ukrainian satellite navigation system: status and perspective

S. Nesterenko, D. Yermolenko, O. Shefer, A. Kliepko

**Abstract.** The main operating and perspective navigation satellite systems of the world are analyzed, including several regional regions, by positioning accuracy, coverage area, number of spacecrafts launched into orbit, activating system updates. It is shown that, depending on programming, all above-mentioned navigation systems are compatible and can functionally complement each other. Further improvement of positioning quality is possible with the help of the global system of differential correction SBAS (Space Based Augmentation System) in North and South America, Europe and Japan. Methods of DGPS and RTK from ground base states are used for correction of GPS-data in Ukraine. The possibilities of the Ukrainian space industry are studied. The Concept of the state space program is analyzed. It provides launching the satellite "Sich-2-30" with a service life of 5 years, as well as its subsequent annual addition by several satellites during the next 5 years. Previously positive changes in the Ukrainian space industry revealed the shortcomings and problems of its full development: lack of financing, instability of legal state regulation, the need for long-term research to assess the level of positioning quality. The Sich-2-30 satellite will not be able to provide Ukraine with full information independence, and, consequently, financial independence from other suppliers of cartographic images, as the obtained images will have a relatively low-level optical power. It is noted there is the need to develop its own Ukrainian navigation system to obtain digital images on the Earth's surface. The state would get the possibility of continuous monitoring of various phenomena, industries, sectors, such as land management, agricultural, environmental, architectural and construction, economic forecasts, climate, law enforcement, military and others. Due to the effective operation of the Ukrainian navigation satellite system, it is possible to participate in various international programs, including the Moon exploration. It's also provided fully integration into the European space system, required by the Association Agreement between Ukraine and the EU.

**Keywords:** navigation satellite systems, positioning accuracy, coverage area, monitoring.

Р. Е. Пашенко<sup>1</sup>, М. В. Марюшко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, Харків, Україна

<sup>2</sup>Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

## МОНІТОРИНГ ЗМІН СТАНУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ЗЕМЕЛЬ ЗА ДАНИМИ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ

**Анотація.** Відсутність загальних підходів до оцінки стану сільськогосподарських земель за даними ДЗЗ показує, що задача моніторингу змін їх стану є до кінця не вирішеною. У статті розглянута можливість використання фрактального аналізу космічних знімків супутника Sentinel-2 сільськогосподарських земель для визначення змін їх стану під впливом різних чинників. Оцінені характеристики космічних знімків супутника Sentinel-2 заданої території з сільськогосподарськими полями на них. Наведено порядок побудови поля фрактальних розмірностей та розрахунку фрактальної розмірності з використанням методів, які найчастіше застосовують на практиці для аналізу цифрових зображень – методи покриття і призми. Показано, що розрахунок і візуалізація ПФР космічних знімків сільськогосподарських земель дозволяє здійснювати їх сегментацію і виділяти межі проведених польових робіт, зміну їх у часі та оцінювати їх структуру після завершення робіт. Визначено, що під час фрактального аналізу космічних знімків супутника Sentinel-2 доцільно використовувати мінімальні або різниці фрактальних розмірностей. Показано, що для автоматизації процесу сегментації різних структур на космічному знімку можна застосовувати гістограму ПФР і селективні зображення. Запропоновано метод моніторингу змін стану сільськогосподарських земель з використанням фрактального аналізу, який дозволяє визначити межі аномалій на зображенні, початок зміни стану земель, обсяг проведених робіт та їх тривалість, а також оцінювати структуру земель.

**Ключові слова:** моніторинг стану сільськогосподарських земель, космічний знімок, фрактальний аналіз, фрактальна розмірність.

### Вступ

Моніторинг сільськогосподарських земель дозволяє регулярно отримувати інформацію про стан і структуру земельних ділянок та посівних площ, а також здійснювати виявлення ділянок землі, що заросли чагарником, або мають ерозійні порушення, збільшені вологу, заболочування та інші види деградації землі [1]. Крім того, агроекологічний моніторинг дозволяє оцінювати (виявляти факти) вплив природних, техногенних і антропогенних факторів на посіви сільськогосподарських культур [2].

У сучасних умовах динаміка проведення сільськогосподарських робіт потребує оперативної оцінки їх результатів і стану сільськогосподарських культур. Вирішення цих завдань забезпечує регулярний космічний моніторинг земель сільськогосподарського призначення, який забезпечує оперативність (актуальні знімки отримуються з періодичністю 5-8 діб), об'єктивність (отримані дані відображають реальний стан рослинності), єдине представлення результатів (інформація надходить від відкаліброваних датчиків) та оглядовість (отримуються знімки великої площі з просторовою роздільною здатністю на рівні 10-30 м) [3]. Крім того, останнім часом спостерігається тенденція зростання доступності до даних дистанційного зондування. Наприклад, космічні знімки Sentinel-2 надаються користувачам у вільному доступі через мережу Інтернет (існує актуальна та постійно поповнювальна база космічних знімків), що дозволяє їх застосування для вирішення різноманітних задач [4, 5]. Супутники Sentinel-2 дозволяють отримувати широкопосмугові мультиспектральні зображення з високим просторовим розподілом (в одному пікселі 10 м) за допомогою знімальної апаратури MSI (Multispectral Instrument) у 13 спектральних діапазонах [5]. Космічні

знімки супутника Sentinel-2 на задану територію можна отримувати 2 рази на тиждень.

Всі ці чинники є дуже важливими для організації моніторингу сільськогосподарських земель, але у більшій мірі достовірність одержуваних результатів залежить від способу обробки космічних знімків, а користувачів цікавить кінцевий результат і його представлення для прийняття управлінських рішень.

Більшість методів моніторингу стану сільськогосподарських земель базуються на використанні вегетаційних індексів (існує близько 160 варіантів таких індексів) [6], які визначаються емпірично і враховують фізичні властивості світла, відбиваючу здатність рослин та інші важливі характеристики. Найбільше розповсюдження отримав нормалізований різницевої вегетаційний індекс (NDVI). В [7] приведені результати досліджень змін індексу NDVI різночасових космічних знімків сільськогосподарських земель. У роботі вказується, що для розрахунку індексу NDVI необхідно дані з ближнього інфрачервоного та червоного каналів, що призводить до ускладнення отримання вихідного зображення. У роботі [8] також вказується, що індекс NDVI у значній мірі залежить від кількості активної біомаси та стає неефективним в періоди, коли рослинність є послабленою або спостерігається низький рівень вегетації.

Також для вирішення задач моніторингу підстильної поверхні та оцінки її стану у теперішній час широко використовуються дані гіперспектральної зйомки [9]. Спеціальні алгоритми аналізу таких знімків дозволяють визначити спектральні параметри поглинання рослинності. Але до апаратури отримання гіперспектральних знімків висуваються високі вимоги щодо її абсолютного або відносного радіометричного калібрування, яке у подальшому впливає на якість отриманих даних і на достовірність результатів їх обробки. Все це приводить до збільшення складності і вартості



апаратури отримання космічних знімків, а також до ускладнення алгоритмів їх обробки

Перспективним напрямком підвищення інформативності космічних знімків, які отримуються тільки в одному діапазоні хвиль, є застосування методів фрактального аналізу зображень [10, 11]. Різна складність поверхонь та рослинності приводить до різних форм цифрового зображення, складність яких можна кількісно оцінити за допомогою величини фрактальної розмірності (ФР). У роботі [12] на основі даних дистанційного зондування та використання ФР показана можливість розподілу різних типів ґрунтів, а у роботі [13] показана можливість застосування фрактального аналізу космічних знімків Sentinel-2 для оцінки стану посівів кукурудзи на різних фазах вегетації. Але в цих роботах не розглядаються питання моніторингу змін стану сільськогосподарських земель, які викликані впливом різних чинників. У зв'язку з цим представляє практичний інтерес провести аналіз величин ФР космічних знімків під час зміни стану сільськогосподарських земель, які обумовлені різними чинниками.

**Мета статті:** розглянути можливість використання фрактального аналізу космічних знімків сільськогосподарських полів для визначення змін їх стану під впливом різних чинників.

### Характеристика космічних знімків сільськогосподарських полів

Моніторинг стану сільськогосподарських земель на великих територіях вимагає багато часу та великих людських трудовитрат. Для здійснення ефективного моніторингу їх стану будемо використовувати космічні знімки супутника Sentinel-2, які є у вільному доступі в мережі Інтернет [4, 5].

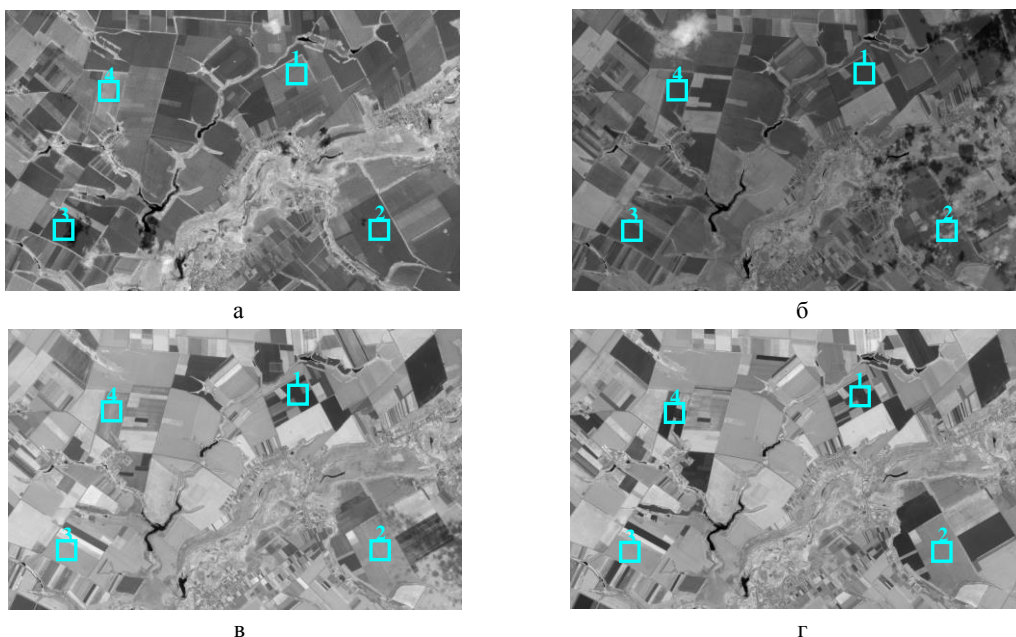
На відміну від використання вегетаційних індексів, коли необхідно застосовувати дані декількох спектральних каналів, під час фрактального аналізу достатньо одного каналу. Розглянемо можливість викорис-

тання ближнього інфрачервоного діапазону супутника Sentinel-2, якому відповідає канал b8 (832 нм). В цьому каналі фіксуються дані, що формуються за рахунок відбиття сонячного випромінювання хлорофілом рослин. Для оцінки змін стану сільськогосподарських земель було створено базу космічних знімків з супутника Sentinel-2 земель Вільхуватської сільської ради Чутівського району Полтавської області, переважну частину яких обробляє приватне сільськогосподарське підприємство «Дружба». База космічних знімків містить зображення за 2018 рік у чотирьох діапазонах (b2, b3, b4 – канали видимого діапазону; b8 – широка смуга ближнього інфрачервоного діапазону) з просторовим розрізненням 10 метрів. На рис. 1, а-г для прикладу наведено космічні знімки каналу b8 супутника Sentinel-2 станом на 04.06.18 (а), 26.06.18 (б), 29.07.18 (в), 05.08.18 (г).

Як видно на рис. 1, на космічних знімках супутника Sentinel-2 візуально розподіляються землі сільськогосподарського призначення, їх межі, а також виділяються елементи природного ландшафту (річки, яри та ін.), а також штучні об'єкти, створені людьми (дороги, будинки та ін.). При цьому поля мають різну форму з різним типом сільськогосподарських культур на них. Але візуально визначити тип цих культур неможливо, а визначення змін стану полів є важким завданням і потребує різночасових космічних знімків.

Для подальшого дослідження змін стану земель були вибрані чотири поля, які на рис. 1 позначені квадратами і цифрами:

- поле 1 з посівами кукурудзи (рис. 1, а, б) на якому проводилися польові роботи (рис. 1, в, г);
- поле 2 з посівами кукурудзи (рис. 1, а, в, г) над яким в одну добу були хмари (рис. 1, б);
- поле 3 з посівами соняшника (рис. 1, б, в, г) та тіні хмар на ньому (рис. 1, а);
- поле 4 з посівами ячменя (рис. 1, а, б, в) на якому проводилися польові роботи (рис. 1, г).



**Рис. 1.** Землі Вільхуватської сільської ради станом на 04.06.18 (а), 26.06.18 (б), 29.07.18 (в), 05.08.18 (г) в ближньому інфрачервоному діапазоні (канал b8)

Для подальшого фрактального аналізу змін стану сільськогосподарських земель з вихідних космічних знімків (які зберігаються у базі даних) необхідно провести попереднє вирізання зображень вибраних для дослідження полів (рис. 1). На рис. 2, а-з наведено елементи космічних знімків (канал b8) з полем 1 засіяним кукурудзою на зерно, на якому з часом проводилися польові роботи. Знімки були вибрані у різний час, станом на 01.06.18 (а), 14.06.18 (б), 29.06.18 (в), 29.07.18 (г), 05.08.18 (д), 08.08.18 (е), 10.08.18 (ж), 18.08.18 (з), щоб показати наявність на них різного стану поля. Зображення на рис. 2 представлені у градаціях сірого формату \*.bmp і мають розміри 56×56 пікселів, при цьому операції поліпшення якості зображення не проводилися. Розмір зображення 56×56 пікселів був вибраний з міркувань отримання однорідної структури поля на знімку.

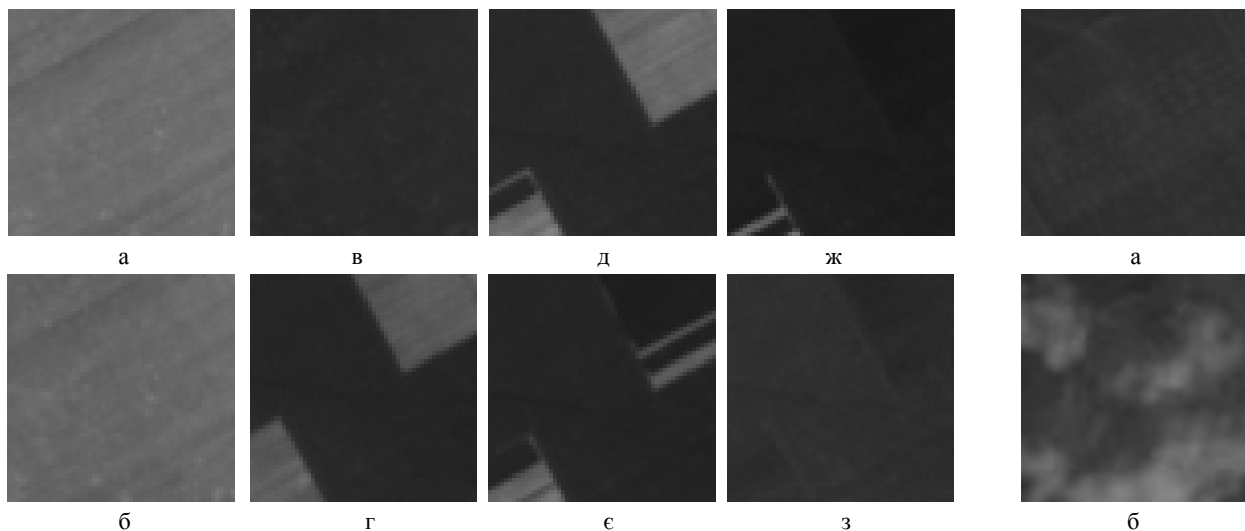
Аналіз даних, наведених на рис. 2, показує, що на знімках станом на 01.06.18 (а), 14.06.18 (б), 29.06.18 (в) спостерігається однорідне поле з кукурудзою на різних стадіях вегетації. На знімках ста-

ном на 29.07.18 (г), 05.08.18 (д), 08.08.18 (е), 10.08.18 (ж) видно, що проводилися польові роботи і стан поля змінювався, а на знімку станом на 18.08.18 (з) роботи були закінчені і знову спостерігається однорідне поле, але уже зоране. Але візуальний аналіз дозволяє лише якісно оцінити масштаби робіт і зміну структури поля. Кількісна оцінка цих змін без подальшої обробки неможлива.

На рис. 3, а, б наведено елементи космічних знімків (канал b8) з полем 2 засіяним кукурудзою станом на 26.06.18 (а) і станом на 29.06.18 (б), коли над цим полем були хмари. Зображення на рис. 3 також представлені у форматі \*.bmp і мають розміри 56×56 пікселів.

Як видно з візуального аналізу космічних знімків, наведених на рис. 3, зображення поля станом на 26.06.18 (а) має однорідну структуру, а станом на 29.06.18 (б) має деякі зміни, що проявляються у вигляді неоднорідностей світлого кольору.

Як і у попередньому випадку без подальшої обробки кількісно оцінити зміну структури зображення неможливо.



Елементи космічних знімків (канал b8) з полем кукурудзи

**Рис. 2.** На полі проводилися польові роботи, станом на: 01.06.18 (а); 14.06.18 (б); 29.06.18 (в); 29.07.18 (г); 05.08.18 (д); 08.08.18 (е); 10.08.18 (ж); 18.08.18 (з)

**Рис. 3.** Хмари над полем: 26.06.18 (а); 29.06.18 (б)

На рис. 4, а, б наведено елементи космічних знімків (канал b8) з полем 3 засіяним соняшником станом на 01.06.18 (а) і станом на 04.06.18 (б), коли на це поле падала тінь від хмар.

Розмір зображення на рис. 4 також складає 56×56 пікселів. Як і у попередніх випадках, зображення поля без аномалій (станом на 01.06.18) має однорідну структуру, а поява аномалії (станом на 04.06.18) проявляється у зміні його структури. Але під час виникнення аномалії за рахунок тіні хмари, зміна структури зображення візуально практично не спостерігається у зв'язку з низьким контрастом між зображенням поля і зображенням тіні хмари. Тому виявити її на зображенні дуже важко.

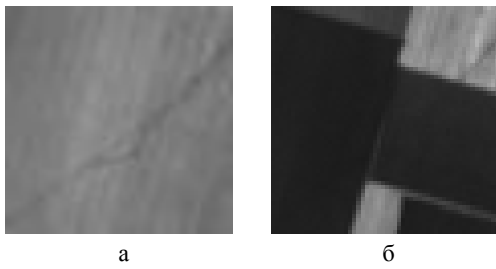
На рис. 5, а, б наведено елементи космічних знімків (канал b8) з полем 4 засіяним ячменем (станом на 29.07.18 (а)) на якому проводилися польові роботи (станом на 05.08.18 (б)). Розмір зображення

складає 56×56 пікселів. Знімки цього поля були вибрані для дослідження впливу на оцінку зміни стану поля типу сільськогосподарської культури та різного характеру його обробки.

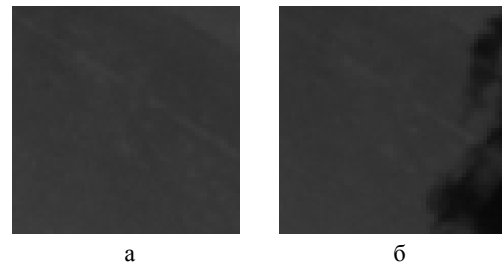
Як видно на рис. 5, зображення поля станом на 29.07.18 має структуру, яка відрізняється від структури полів наведених вище (рис. 2, в, рис. 3, а, рис. 4, а), що проявляється у наявності на зображенні польової дороги та інших градацій сірого всього поля.

Структура обробленого поля станом на 05.08.18 також відрізняється від зображень польових робіт, наведених на рис. 2, г-ж. Для кількісної оцінки змін структури зображення поля необхідно проводити подальшу обробку.

Таким чином, візуальний аналіз космічних знімків дозволяє лише якісно оцінювати зміну стану сільськогосподарських земель.



**Рис. 4.** Елементи космічних знімків (канал b8) з полем соняшника та тіні хмар на ньому, станом на: 01.06.18 (а); 04.06.18 (б)



**Рис. 5.** Елементи космічних знімків (канал b8) з полем ячменю, на якому проводилися польові роботи, станом на: 29.07.18 (а); 05.08.18 (б)

Розрізнення типу поля з різним рослинним покривом і визначення типу аномалій, яка спостерігається на космічних знімках сільськогосподарських земель тільки за результатами візуального аналізу є важким завданням.

Проведемо обробку космічних знімків супутника Sentinel-2, розглянутих вище сільськогосподарських земель, у літній період 2018 року (з 01.06.18 до 28.08.18) з використанням фрактального аналізу.

### Виявлення змін стану земель з використанням фрактальної розмірності

Під час моніторингу змін стану сільськогосподарських земель з використанням каналу b8 супутника Sentinel-2 носієм інформації на зображенні є світлові хвилі у ближньому інфрачервоному діапазоні, що формуються за рахунок відбиття сонячного випромінювання у залежності від характеристик підстильної поверхні. Світлова хвиля переносить інформацію про об'єкт завдяки тому, що різні параметри світлової хвилі модулюються відповідно до властивостей точок підстильної поверхні. В результаті отримуємо різнорідну матрицю значень інтенсивності відбиття сонячного випромінювання від земної поверхні (космічне зображення). Розмір матриці дорівнює розміру космічного зображення.

Основою фрактального аналізу космічних (цифрових) зображень є побудова поля фрактальних розмірностей (ПФР). Процес побудови ПФР детально розглянуто у роботі [11]. Під час побудови ПФР проводиться сканування зображення  $I(x, y)$  «вікном»  $W$ , розміром  $n \times m$  пікселів, з кроком переміщення  $s$  (при  $s = 1$  «вікно» є таким, що «ковзає», а при  $s > 1$  – що «стрибає»). На кожному кроці (для кожного положення «вікна») визначається чисельне значення ФР  $(D_{i,j})$  у «вікні»  $W$  і записується в матрицю  $D$ , яка називається «полем фрактальних розмірностей». Розмір ПФР буде менше розміру космічного зображення на величину «вікна»  $(x - n) \times (y - m)$ . Під час побудови ПФР у роботі розміри космічного зображення  $(x \times y)$  будуть складати  $56 \times 56$  пікселів, а розміри «ковзаючого вікна» будуть змінюватися від  $4 \times 4$  пікселі до  $32 \times 32$  пікселі.

Фрактальна розмірність є дробовою величиною, яка характеризує складність (порізанисть) форми, що заповнює простір. Більшому значенню ФР відповідає більша ступінь заповнення тривимірного

представлення зображення. Існує багато методів розрахунку розмірності, але всі вони включають підрахунок об'єму або площі фрактальної форми і того, як вона змінюється в різних масштабах. Залежно від цього існують різні типи ФР [10]. Фрактальна розмірність сильно залежить від того, як її визначати, тобто окрім формули для розрахунку необхідно задати спосіб її визначення. На практиці найчастіше для аналізу цифрових зображень з використанням ФР застосовують метод покриття [14] і метод призми [15]. Метод покриття розрахунку ФР реалізує визначення розмірності Хаусдорфа-Безіковича, яка описується таким виразом:

$$D_1 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)}, \quad (1)$$

де  $\varepsilon$  – довжина сторони куба (максимальна довжина дорівнює розміру «вікна»), яким покривають множину зображення;  $N(\varepsilon)$  – кількість кубів, що накривають тривимірне уявлення зображення.

Метод призми розрахунку ФР забезпечує визначення розмірності таким виразом:

$$D_2 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log P(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)}, \quad (2)$$

де  $\varepsilon$  – довжина сторони основи зрізаної призми (максимальна довжина дорівнює розміру «вікна»);  $P(\varepsilon)$  – площа поверхні призми (її верхньої грані).

Безпосередньо за цими формулами розрахувати ФР зображення підстильної поверхні неможливо. Порядок визначення ФР полягає у наступному.

На першому етапі реалізації методу покриття вибирається деякий куб з стороною довжиною  $\varepsilon$  і цим кубом покривається тривимірне представлення зображення (множина  $I$ ). На другому етапі підраховується скільки кубів з стороною  $\varepsilon$  накривають всю множину  $I$  (зображення)  $N(\varepsilon)$ .

На першому етапі реалізації методу призми за даними яскравості зображення у кутах «вікна» (основи призми) розміром  $\varepsilon$  формується верхня грань призми, а на другому етапі розраховується її площа  $P(\varepsilon)$ .

На третьому етапі в обох методах проводяться обчислення  $N(\varepsilon)$  і  $P(\varepsilon)$ , відповідно, для декількох інших величин  $\varepsilon$  (наприклад, друга величина може дорівнювати  $\varepsilon_2 = \varepsilon_1/2$ , третя –  $\varepsilon_3 = \varepsilon_1/4$ , а четверта –  $\varepsilon_4 = \varepsilon_1/8$ ). В результаті визначаються, наприклад, по чотири значення  $N(\varepsilon)$  і  $P(\varepsilon)$ . Число значень (точок) залежить від структури (форми) вихідних даних.

Далі в обох методах будуються графіки логарифмічної залежності  $\log N(\epsilon)$  або  $\log P(\epsilon)$  від  $\log 1/\epsilon$ . За одержаними даними здійснюється лінійна апроксимація одержаних залежностей. Для апроксимації найчастіше використовується метод найменших квадратів (МНК), який дозволяє автоматизувати процес аналізу кутів нахилу для різних вхідних даних. На завершальному етапі фрактальна розмірність  $D$  визначається як тангенс кута нахилу апроксимованих прямих.

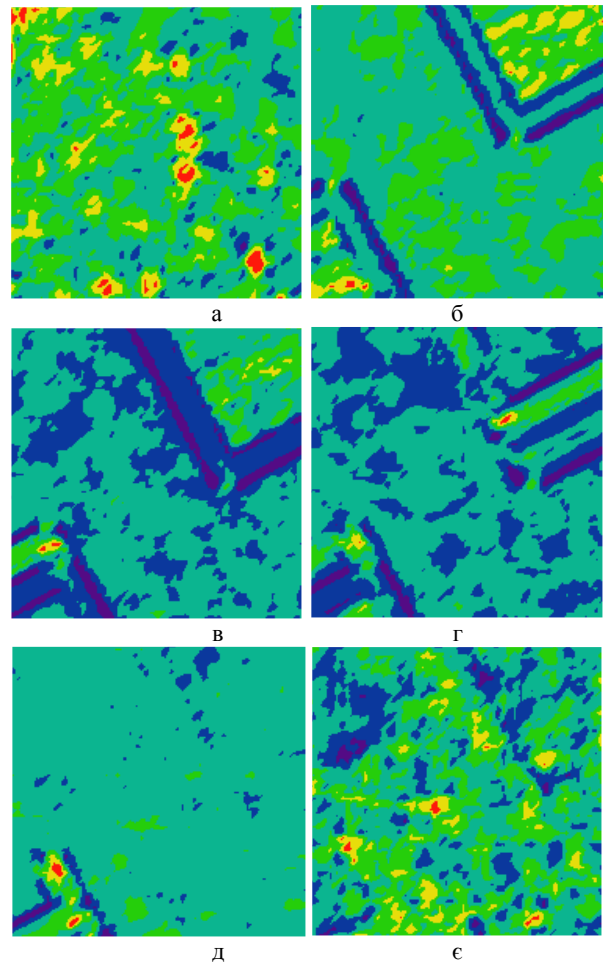
Таким чином, обчислення різних геометричних параметрів тривимірного уявлення зображення і використання методу найменших квадратів дозволяє визначати ФР космічних (цифрових) зображень.

Після розрахунку ПФР можна здійснити його візуалізацію, тобто весь діапазон змін ФР, що є у ПФР, розбивається на декілька рівнів (пороги сегментації). При цьому кожен рівень відображається відповідним кольором (виділяються сегменти із заданими ФР). При близьких структурах зображень в сусідніх «вікнах» ФР мають близькі значення (відрізняються в четвертому знаку після коми). «Вікна» з близькими значеннями ФР можуть бути об'єднані в окремі області, які забезпечують сегментацію зображення.

Для прикладу на рис. 6, а-є наведено візуальні представлення ПФР розраховані для космічних знімків з полем 1 засіяним кукурудзою на зерно на якому проводилися польові роботи, станом на 29.06.18 (а), 29.07.18 (б), 05.08.18 (в), 08.08.18 (г), 10.08.18 (д), 18.08.18 (є), які показані на рис. 2, в-з. Наведені ПФР космічних знімків були побудовані з використанням методу призми і «ковзаючого вікна» розміром  $5 \times 5$  пікселів. Діапазон змін ФР розбивався на 5 рівнів.

Як видно на рис. 6, візуалізація ПФР дозволяє представити розподіл частин зображення з різною структурою, тобто здійснити його сегментацію. На рис. 6, а видно, що посіви кукурудзи без обробки, також мають деякі особливості, які на вихідному зображенні візуально не спостерігаються. На рис. 6, б-д видно, що побудова і візуалізація ПФР дозволяє досліджувати зміну стану сільськогосподарських земель, які обумовлені проведенням польових робіт. На ПФР добре визначаються межі ділянок поля на яких проводяться роботи. Крім того, виділяються межі недавно проведених робіт, особливо це видно на рис. 6, б, в, де видно дві межі, одна – відокремлює ділянки поля з різним типом поверхні, а інша – ділянки з різним часом проведення польових робіт.

Необхідно зазначити, що на вихідних космічних зображення візуально проявляється тільки межа з різним типом поверхні (див. рис. 2, г, д). На рис. 6, г, д виділяються ділянки поля, на яких роботи ще не закінчені, тобто виділяються локальні аномалії поля. ПФР космічного знімка після завершення польових робіт (рис. 6, є) також дає можливість оцінити зміни структури поля. Так на ПФР проявляються ділянки поля з різними значеннями ФР, які характеризують різний тип підстильної поверхні обумовлений якістю проведення польових робіт (на вихідних космічних зображення вони майже не проявляються (див. рис. 2, з).



**Рис. 6.** ПФР космічних знімків з полем кукурудзи на якому проводилися польові роботи, станом на: 29.06.18 (а); 29.07.18 (б); 05.08.18 (в); 08.08.18 (г); 10.08.18 (д); 18.08.18 (є)

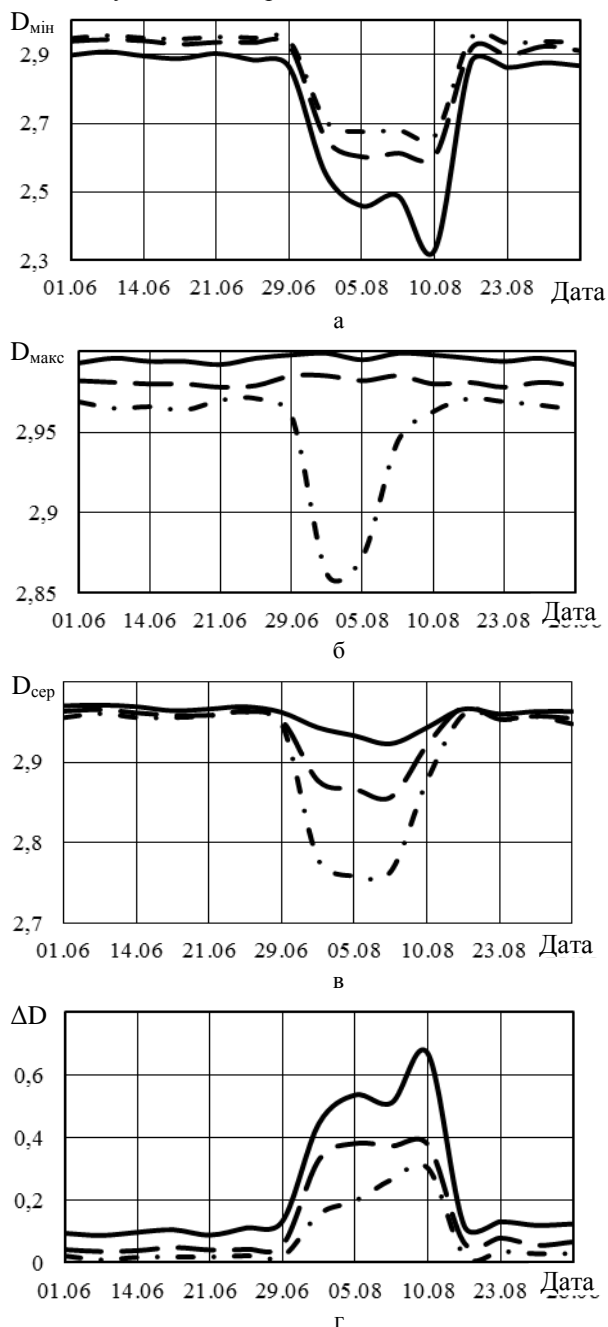
Таким чином, розрахунок та візуалізація ПФР космічних знімків сільськогосподарських земель дозволяє здійснювати їх сегментацію і виділяти межі проведених польових робіт, зміну їх у часі та оцінювати їх структуру після завершення робіт.

Крім фрактального аналізу космічних зображень за допомогою побудови і візуалізації ПФР, за допомогою різночасових космічних знімків і розрахунку їх ФР можна здійснювати моніторинг початку і закінчення польових робіт за величиною ФР. Як зазначалося вище, величини ФР залежать від складності (порізаності) перепадів яскравості зображення, тому зміна величини ФР може бути використана для виявлення зміни стану поля. Для розрахунку ФР космічних знімків сільськогосподарських земель використовувався програмний комплекс фрактального аналізу зображень, який докладно описаний у роботі [11]. Даний комплекс дозволяє аналізувати зображення у градаціях сірого (у форматі \*.bmp) з використанням «ковзаючого» і «стрибаючого» «вікна» в яких розраховується ФР методом покриття. Крім того, передбачена можливість побудови гістограми ПФР, її аналіз і побудова селективних зображень вибраного діапазону ФР. Також у програмному комплексі реалізована можливість визначення мінімального і максимального значення ФР, а також

розрахунку середнього значення ФР на ПФР. За допомогою програмного комплексу були визначені ФР космічних знімків сільськогосподарських земель у літній період 2018 року (з 01.06.18 до 28.08.18).

На рис. 7, а-г наведено результати розрахунку мінімальних ФР (а), максимальних ФР (б), середніх ФР (в) і різниць ФР (г) космічних знімків з полем 1 кукурудзи на якому проводилися польові роботи. Суцільною лінією позначені ФР, що розраховувалися у «вікні» 4×4 пікселя, штриховою – у «вікні» 16×16 пікселя, штрих-пунктирною – 32×32 пікселя.

Як видно з аналізу даних, наведених на рис. 7, всі величини ФР, що визначалися під час фрактального аналізу змін стану поля, мають свої особливості. Так мінімальні ФР (рис. 7, а) найбільш чутливі до змін стану земної поверхні.



**Рис. 7.** Зміни мінімальних ФР (а), максимальних ФР (б), середніх ФР (в) і різниць ФР (г) космічних знімків з полем кукурудзи на якому проводилися польові роботи

Так до початку польових робіт мінімальні ФР коливаються близько 2,9 для «вікна» 4×4 пікселя і близько 2,95 для «вікон» 16×16 і 32×32 пікселя, а з початком робіт 29.07.18 мінімальні ФР зменшуються до значень  $D_{\min 4 \times 4} = 2,554$ ,  $D_{\min 16 \times 16} = 2,654$  і  $D_{\min 32 \times 32} = 2,706$ . Під час проведення робіт мінімальні ФР для «вікон» 16×16 і 32×32 пікселя змінюються не значно і коливаються близько 2,6 і 2,68, відповідно. Використання «вікна» 4×4 пікселя дозволяє досліджувати стан проведення польових робіт, так станом на 05.08.18 і 08.08.18 мінімальні ФР відрізняються не значно і близькі до значення 2,5, станом на 10.08.18 спостерігається найменше мінімальне ФР –  $D_{\min 4 \times 4} = 2,33$ . Після закінчення польових робіт мінімальні ФР знову зростають і коливаються близько 2,87 для «вікна» 4×4 пікселя і близько 2,92 для «вікон» 16×16 і 32×32 пікселя.

Таким чином, під час зміни стану сільськогосподарських земель, обумовлених польовими роботами, спостерігається зменшення мінімальних ФР, при цьому використання «вікна» розміром 4×4 пікселя найбільш придатне для аналізу ходу проведення польових робіт.

Використання максимальних ФР для аналізу зміни стану поля (рис. 7, б) є менш інформативним, але використання «вікон» рівних 32×32 пікселя і більше дозволяє визначити початок польових робіт, так станом на 29.07.18 і 05.08.18 максимальні ФР дорівнюють  $D_{\max 29.07} = 2,862$  і  $D_{\max 05.08} = 2,873$ , відповідно, тобто вони знижуються. Необхідно зазначити, що станом на 08.08.18 і 10.08.18, коли роботи ще тривали, максимальні ФР були на рівні максимальних ФР без робіт на полі. До початку і після закінчення польових робіт максимальні ФР у «вікні» 32×32 пікселя коливаються на рівні близькому 2,7. Максимальні ФР при використанні менших «вікон» 4×4 і 16×16 пікселя не змінюються під час проведення польових робіт і на всьому інтервалі спостережень коливаються близько значень 2,99 і 2,98, відповідно.

Таким чином, використання максимальних ФР для аналізу зміни стану сільськогосподарських земель можливе тільки під час застосування «вікон» рівних 32×32 пікселя і більше, використання менших «вікон» не інформативно. Але одночасне зменшення мінімальних і максимальних ФР може характеризувати наявність на полі великих аномалій (розмір яких вище розміру «вікна» в якому спостерігається зменшення максимальних ФР), а зменшення мінімальних ФР і незмінність максимальних ФР може характеризувати наявність на полі невеликих аномалій (розмір яких менше розміру «вікна» в якому спостерігається зменшення мінімальних ФР).

Середні значення ФР (рис. 7, в) є інформативними для аналізу зміни стану поля, якщо використовуються «вікна» розміром більше 16×16 пікселя. До початку і після закінчення польових робіт середні ФР для всіх «вікон» коливаються на рівні близькому 2,96. Початку польових робіт відповідають наступні середні ФР:  $D_{\text{ср} 4 \times 4} = 2,943$ ,  $D_{\text{ср} 16 \times 16} = 2,877$  і  $D_{\text{ср} 32 \times 32} = 2,779$ . Під час проведення робіт середні ФР змінюються не значно, найбільше зниження середніх ФР спостерігається під час завершення робіт,

станом на 08.08.18. Таким чином, використання середніх ФР дозволяє аналізувати зміни стану сільськогосподарських земель тільки під час застосування «вікон» розміром більше  $16 \times 16$  пікселів. Визначити характер проведених польових робіт за середніми значеннями ФР важко.

Поряд з мінімальними ФР, чутливими до змін стану земної поверхні є різниці ФР  $\Delta D = D_{\max} - D_{\min}$  (рис. 7, г). Так до початку польових робіт різниці ФР складають менше 0,1 для «вікна»  $4 \times 4$  пікселя та менше 0,05 і 0,025 для «вікон»  $16 \times 16$  і  $32 \times 32$  пікселя, відповідно, а після завершення робіт різниці ФР складають менше 0,13 для «вікна»  $4 \times 4$  пікселя та менше 0,08 і 0,03 для «вікон»  $16 \times 16$  і  $32 \times 32$  пікселя, відповідно. Під час проведення польових робіт різниці ФР збільшуються із зменшенням розміру «вікна» і досягають найбільших значень 10.08.18  $\Delta D_{4 \times 4} = 0,668$ ,  $\Delta D_{16 \times 16} = 0,376$  і  $\Delta D_{32 \times 32} = 0,3$ . Нерівномірне збільшення різниць ФР під час проведення робіт може характеризувати їх обсяг (площу обробленого поля). Особливо це проявляється під час застосування невеликого «вікна»  $4 \times 4$  пікселя і великого «вікна»  $32 \times 32$  пікселя, для «вікон» середнього розміру різниця ФР на протязі проведення робіт практично не змінюється. Таким чином, різниця ФР у «вікні» розміром  $4 \times 4$  пікселя дозволяє здійснювати моніторинг змін стану сільськогосподарських земель.

У табл. 1 наведені величини ФР під час обробки цілих космічних знімків з полем 1 засіяним кукурудзою на якому проводилися польові роботи, тобто використовувалося «вікно» розміром  $56 \times 56$ . Як видно з аналізу даних табл. 1, ФР цілого космічного знімку також дозволяє визначити зміну стану земної поверхні під час проведення польових робіт, яка проявляється у зменшенні величин ФР, а різні величини ФР при цьому дозволяють оцінювати їх обсяг.

Також з даних табл. 1 видно, що величини ФР поля засіяного кукурудзою у червні будуть вище у порівнянні з ФР зораного поля у кінці серпня, але не значно (відмінність у другому знаку після коми).

Таблиця 1 – Фрактальні розмірності цілих космічних знімків з полем 1 засіяним кукурудзою

Дата	D	Дата	D
01.06.18	2,958	05.08.18	<b>2,792</b>
04.06.18	2,965	08.08.18	<b>2,737</b>
14.06.18	2,965	10.08.18	<b>2,690</b>
16.06.18	2,957	18.08.18	2,956
21.06.18	2,959	23.08.18	2,942
26.06.18	2,953	25.08.18	2,946
29.06.18	2,947	28.08.18	2,943
29.07.18	<b>2,801</b>		

Таким чином, під час фрактального аналізу космічних знімків супутника Sentinel-2 для оцінки змін стану сільськогосподарських земель доцільно використовувати мінімальні ФР (зменшення ФР) або різниці ФР (збільшення різниць) у «вікні» розміром  $4 \times 4$  пікселя. Розрахунок ФР у «вікнах» різно-

го розміру і одночасне застосування мінімальних і максимальних ФР дозволяє оцінити розміри аномалій на полі (ходу проведення польових робіт).

Проведемо фрактальний аналіз космічних знімків з полями 2-4, елементи яких наведено на рис. 3-5. Під час розрахунків будемо використовувати «вікно» розміром  $4 \times 4$  пікселя.

На рис. 8 наведено результати розрахунку мінімальних ФР космічних знімків з полем 2 засіяним кукурудзою та хмарами над ним, елементи яких наведені на рис. 3.

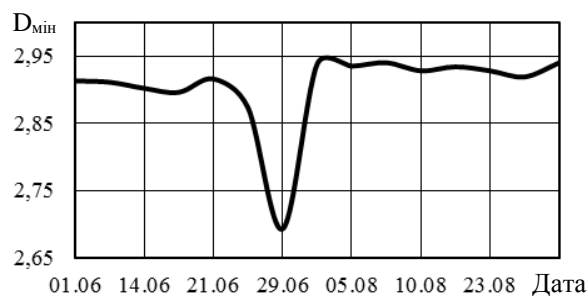


Рис. 8. Зміни мінімальних ФР космічних знімків з полем кукурудзи та хмарами над ним

Як видно на рис. 8 поява над полем хмар 29.06.18 приводить до зменшення мінімальної ФР, але величина зменшення ФР буде менше ніж під час аналізу космічного знімку поля на якому проводяться польові роботи. Так різниця ФР космічного знімку поля з хмарами складає  $\Delta D_2 = 0,3$ , а різниця ФР під час проведення польових робіт дорівнює  $\Delta D_1 = 0,667$  (див. рис. 7, г), тобто у 2,22 рази менше. Таким чином, використання мінімальних ФР або різниць ФР дозволяє виявляти зміну структури космічного зображення, яке обумовлено дією природних явищ (хмар).

На рис. 9 наведено результати розрахунку мінімальних ФР космічних знімків з полем 3 засіяним соняшником та тіні хмар на ньому, елементи яких наведені на рис. 4. З аналізу даних на рис. 9 видно, що поява на космічному знімку 04.06.18 тіні від хмар призводить до зменшення мінімальної ФР. Але різниця ФР космічного знімку поля з тіною ( $\Delta D_3 = 0,481$ ) у 1,6 разів більша порівняно з різницею ФР космічного знімку поля з хмарами ( $\Delta D_2 = 0,3$ ) і у 1,39 разів менше порівняно з різницею ФР космічного знімку поля під час проведення польових робіт ( $\Delta D_1 = 0,667$ ).

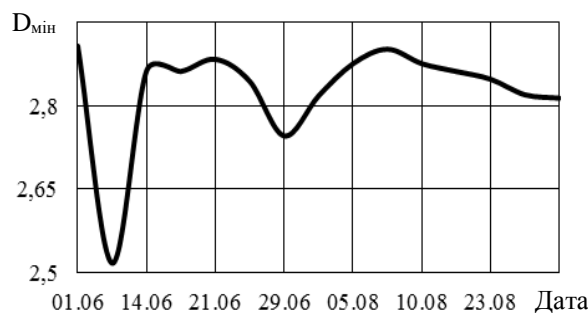


Рис. 9. Зміни мінімальних ФР космічних знімків з полем соняшника та тіні хмар на ньому

Таким чином, мінімальна ФР космічного знімку поля з тіню відрізняється від мінімальних ФР інших антропогенних і природних явищ, що дозволяє здійснювати їх розрізнення.

На рис. 10 наведено результати розрахунку мінімальних ФР космічних знімків з полем 4 засіяним ячменем на якому проводилися польові роботи, елементи яких наведені на рис. 5. Цей випадок аналогічний аналізу поля 1 засіяного кукурудзою, але протяжність польових робіт різна та інший тип культури, яка оброблялася.

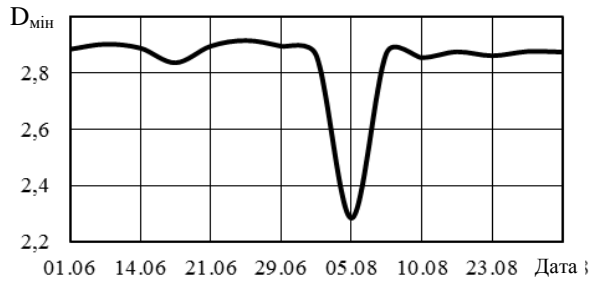


Рис. 10. Зміни мінімальних ФР космічних знімків з полем ячменю на якому проводилися польові роботи

На рис. 10 видно, що 05.08.18 спостерігається зменшення мінімальної ФР на космічному знімку, що свідчить про зміну стану поля. При цьому різниця ФР складає  $\Delta D_4 = 0,715$ , що близько до різниці ФР космічного знімку поля з кукурудзою під час проведення польових робіт ( $\Delta D_1 = 0,667$ ) і відрізняється від різниці ФР космічних знімків поля з хмарами і поля з тіню від хмар. Тобто можна сказати, що зміна стану поля обумовлена проведенням польових робіт. Таким чином, фрактальний аналіз дозволяє визначити космічні знімки з аномальними ділянками на них і розрізнити чинники, що на них впливають.

Для автоматизованого розділення (сегментації) різних структур на космічному зображенні може бути побудована гістограма розрахованого ПФР і створені селективні зображення (зображення, на яких відображаються елементи, які відповідають заданому діапазону ФР). На рис. 11 наведено гістограму ПФР космічного знімку з полем кукурудзи на якому проводилися польові роботи, станом на 29.07.18, який показано на рис. 2, г. По осі абсцис відкладені значення ФР, які є на ПФР, а по осі ординат – частота появи ФР на ПФР.

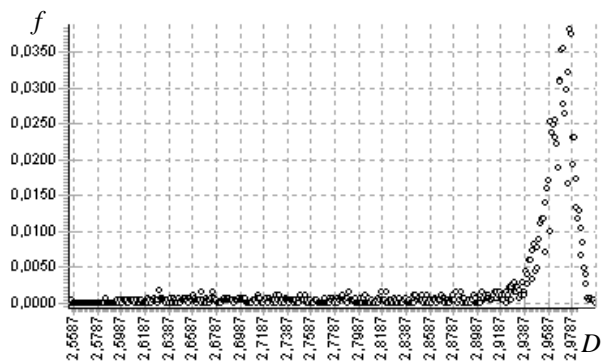


Рис. 11. Гістограма ПФР космічного знімку з полем кукурудзи на якому проводилися польові роботи, станом на 29.07.18

Як видно на рис. 11, на гістограмі ліворуч є довгий «хвіст», який тягнеться від значень ФР 2,54 до 2,92, а праворуч у діапазоні від 2,92 до 2,999 існує пік гістограми, де згрупована більша кількість значень ФР. Побудуємо селективні зображення цих двох діапазонів ФР.

Під час створення селективних зображень координати всіх «вікон» із значеннями ФР в них зберігаються у пам'яті комп'ютера. Після завдання діапазону зміни ФР, на початковому зображенні відображаються «вікна» в яких ФР входять в заданий діапазон. На рис. 12 наведено селективні зображення космічного знімку з полем кукурудзи на якому проводилися польові роботи, станом на 29.07.18:

$$D = 2,54 - 2,92 \text{ (а); } D = 2,92 - 2,999 \text{ (б).}$$

Як видно на рис. 12, першому діапазону гістограми ПФР відповідають межі ділянок поля на яких проводилися роботи, а другому діапазону – безпосередньо самі ділянки. Аналіз селективного зображення другого діапазону також дозволяє визначити (опосередковано) межі цих ділянок. Для дослідження фрактальної структури самих ділянок поля доцільно звужувати початковий діапазон  $D = 2,92 - 2,999$  піку гістограми, наприклад, побудувати селективні зображення для діапазонів  $D = 2,92 - 2,93$ ,  $D = 2,92 - 2,93$  і т. д., а потім – для діапазонів  $D = 2,921 - 2,922$ ,  $D = 2,922 - 2,923$  і т. д.

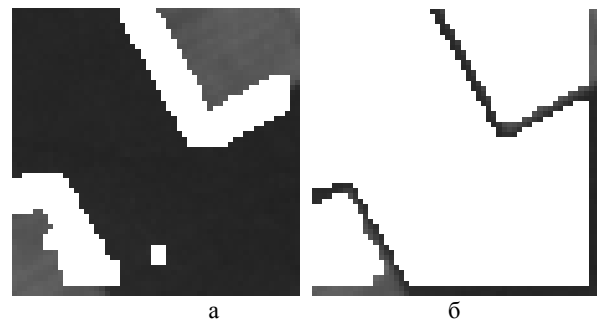


Рис. 12. Селективні зображення космічного знімку з полем кукурудзи на якому проводилися польові роботи станом на 29.07.18:  $D = 2,54 - 2,92$  (а);  $D = 2,92 - 2,999$  (б)

Таким чином, побудова селективних зображень дозволяє визначати межі аномальних ділянок на полі і аналізувати складність початкового зображення.

### Метод моніторингу змін стану сільськогосподарських земель

Проведені вище дослідження дозволяють запропонувати метод моніторингу змін стану сільськогосподарських земель з використанням фрактального аналізу, спрощена схема якого показана на рис. 13.

Як видно на рис. 13, на перших двох етапах визначаються об'єкти дослідження. На першому – отримуються космічні знімки супутника Sentinel-2 заданої території з мережі Інтернет, наприклад з сервісу Copernicus Open Access Hub, який підтримується Європейським Космічним Агенством [4, 5].



**Рис. 13.** Спрощена схема методу моніторингу змін стану сільськогосподарських земель з використанням фрактального аналізу

На другому етапі здійснюється вибір сільськогосподарських земель (полів), які необхідно досліджувати. Ці поля визначаються замовником, а користувач знаходить їх візуально на космічному знімку і після виявлення проводить вирізання зображень полів заданого розміру. Для дослідження змін стану земель користувач створює базу різночасових космічних знімків вибраних полів, яка зберігається у постійній пам'яті комп'ютера.

На третьому етапі вибирається розмір «вікна», яке буде брати участь у побудові ПФР, а також величина «стрибка» (якщо крок переміщення «вікна» дорівнює 1, то «вікно» є «ковзаючим», а якщо крок більше 1 – «стрибаючим»). Розмір «вікна» вибирається у залежності від структури і розміру зображення, а збільшення величини «стрибка» підвищує швидкість обробки зображення (побудови ПФР). Більш докладно підхід до вибору цих параметрів наведено у роботі [11].

На четвертому етапі розраховується поле фрактальних розмірностей (ПФР), при цьому визначення величин ФР доцільно проводити з використанням, або методу покриття [14], або методу призми [15].

Розраховані значення ФР з координатами «вікон», в яких вони визначалися, зберігаються у пам'яті комп'ютера. Побудова ПФР є основою фрактального аналізу.

На п'ятому етапі проводиться візуалізація ПФР з подальшим його аналізом. Під час візуалізації ПФР вибирається кількість рівнів розбиття діапазону змін величин ФР на ПФР. Кожен з рівнів позначається певним кольором або градацією сірого. За рахунок цього здійснюється сегментація змін стану земель. Візуальний аналіз ПФР дозволяє визначити межі аномалій на зображенні (проведених робіт, впливу природних чинників та ін.).

На шостому етапі з використанням серії космічних знімків для яких розраховуються середні ФР, мінімальні ФР, максимальні ФР та їх різниці, визначається початок зміни стану земель, обсяг проведених робіт, їх тривалість та аналізуються аномалії на знімку, що викликані природними або антропогенними чинниками.

Побудова і аналіз гістограми ПФР на сьомому етапі дозволяє визначити розподіл ФР на ПФР (частоту появи) і характерні діапазони змін ФР, а створення селективних зображень – визначити межі аномалій на космічному знімку (проведених робіт та ін.) і оцінити структуру земель на різних ділянках поля.

На завершальному (восьмому) етапі проводиться узагальнення результатів моніторингу змін стану сільськогосподарських земель. При цьому об'єднуються всі дані, що були отримані під час фрактального аналізу: візуалізація ПФР, середні ФР, мінімальні ФР, максимальні ФР, різниці ФР, селективні зображення.

Таким чином, застосування розробленого методу дозволяє здійснювати моніторинг змін стану сільськогосподарських земель.

## Висновки

Відсутність загальних підходів до оцінки стану сільськогосподарських земель за даними ДЗЗ показує, що задача моніторингу змін їх стану є актуальною і до кінця не вирішеною.

Для моніторингу змін стану сільськогосподарських земель може застосовуватися фрактальний аналіз космічних знімків супутника Sentinel-2, які є у вільному доступі у мережі Інтернет.

Основою фрактального аналізу космічних (цифрових) зображень є побудова поля фрактальних розмірностей, під час якого проводиться сканування зображення «вікном» заданого розміру та з заданим кроком переміщення. Для кожного положення «вікна» визначається чисельне значення ФР, яка записується в матрицю ФР.

Розрахунок і візуалізація ПФР космічних знімків сільськогосподарських земель дозволяє здійснювати їх сегментацію і виділяти межі проведених польових робіт, зміну їх у часі та оцінювати їх структуру після завершення робіт.

Визначено, що під час фрактального аналізу космічних знімків супутника Sentinel-2 для оцінки змін стану сільськогосподарських земель доцільно



використовувати мінімальні ФР або різниці ФР під час обробки зображення «вікном» розміром 4×4 пікселя. Зменшення мінімальних ФР або збільшення різниці ФР є ознакою наявності аномального явища на космічному знімку. Розрахунок ФР у «вікнах» різного розміру і одночасне застосування мінімальних і максимальних ФР дозволяє оцінити розміри аномалій на полі.

Показано, що мінімальні ФР і різниці ФР космічних знімків полів на яких наявні аномалії, що обумовлені різними антропогенними і природними чинниками, мають різні значення, що дозволяє здійснювати їх розрізнення.

Для визначення меж аномальних ділянок на полях і аналізу складності космічного зображення

також можна застосовувати гістограму ПФР і побудовані з її допомогою селективні зображення, що дозволяє автоматизувати процес сегментації різних структур на космічному знімку.

Запропоновано метод моніторингу змін стану сільськогосподарських земель з використанням фрактального аналізу, який дозволяє визначати межі аномалій на зображенні (проведених робіт, впливу природних чинників та ін.), початок зміни стану земель, обсяг проведених робіт та їх тривалість, а також оцінювати структуру земель на різних ділянках поля.

Під час подальших досліджень, доцільно здійснити фрактальний аналіз інших каналів космічних знімків Sentinel-2 і зображень полів різних розмірів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли / О.С. Токарева. – Томск: Томский политехнический университет. – 2010. – 148 с.
2. Агроекологічний супутниковий моніторинг / Тараріко О.Г., Сиротенко О.В., Ільєнко Т.В., Кучма Т.Л. – К.: Аграр. наука, 2019. – 204 с.
3. Кашкин В.Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений / Кашкин В.Б., Сухинин А.И. – М.: Логос, 2001. – 264 с.
4. Copernicus Europe's eyes on Earth, Sentinel-2 [Електронний ресурс] / Copernicus Europe's eyes on Earth. – Режим доступу: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus/infrastructure/discover-our-satellites> – 03.07.2021 р.
5. ESA Sentinel Online, Spatial Resolution [Електронний ресурс] / ESA Sentinel Online. – Режим доступу: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial> – 07.07.2021 р.
6. Черепанов А.С. Вегетационные индексы / А.С. Черепанов // ГЕОМАТИКА. – 2011. – № 2(11). – С. 98 – 102.
7. Моніторинг сільськогосподарських культур із застосуванням космічних знімків SENTINEL-2 / Марюшко М.В., Пашенко Р.Е., Коблюк Н.С. // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2019. – №1(89). – С. 99 – 108.
8. Слободяник М.П. Прогнозування врожайності сільськогосподарських культур за матеріалами ДЗЗ та вегетаційними індексами / М.П. Слободяник // Вісник геодезії та картографії. – 2014. – № 6 (93). – С. 16 – 20.
9. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт. – М.: Техносфера. – 2013. – 592 с.
10. Федер Е. Фракталы / Е. Федер – М.: Мир, 1991. – 254 с.
11. Фрактальный анализ процессов структур и сигналов / [Доля Г.Н., Іванов В.К., Пашенко Р.Э. и др.]; Под. ред. Р.Э. Пашенко. – Харьков: "НЭО Экоперспектива", 2006. – 348 с.
12. Analysis of the Earth's Surface Type in Remote Sensing Using Fractal Dimension / R. Pashchenko, M. Mariushko // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), MRRS-2020. – 2020. – pp. 1-4. doi: 10.1109/ukrmw49653.2020.9252811.
13. Марюшко М.В. Фрактальний аналіз космічних знімків SENTINEL-2 для моніторингу сільськогосподарських культур / Марюшко М.В., Пашенко Р.Е. // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2020. – №4(96). – С. 34 – 47.
14. Кроновер, Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах / Р.М. Кроновер. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
15. Clarke K. C. Computation of the Fractal Dimension of Topographic Surface Using the Triangular Prism Surface Area Method // Computers & Geosciences. – 1986. – v. 12, no. 5. – P. 713 – 722.

Received (Надійшла) 30.07.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

### Monitoring changes of agricultural lands condition according to fractal analysis of space imagery

R. Pashchenko, M. Mariushko

**Abstract.** Absence of the general going near the estimation of agricultural lands condition from remote sensing data shows that a task monitoring of their condition changes is not decided to the end. In the study possibility use fractal analysis of space imagery satellite Sentinel-2 agricultural lands are considered for determination changes their condition due to different factors. The descriptions of the Sentinel-2 space imagery for the given territory with agricultural fields on them are estimated. The order construction of the field fractal dimensions (FFD) and calculation of fractal dimension is resulted with the use methods which more frequent all apply practice for digital images analysis are methods of coverage and prism. Showed that a calculation and visualization of agricultural lands space imagery FFD allows to carry out their segmentation and select the limits of conducted field works, time-history of them and to estimate their structure after finish of works. Certainly, that during space imagery satellite Sentinel-2 fractal analysis it is expedient to use minimum or differences of fractal dimensions. Showed that for automation of process segmentation different structures on a space imagery it is possible to apply the histogram of FFD and selective images. The method monitoring changes of agricultural lands condition is offered with the use fractal analysis which allows to determine the anomalies limits on the image, beginning change of the lands condition, volume of the conducted works and time-history of them, and also to estimate the lands structure.

**Keywords:** monitoring the condition of agricultural lands, space imagery, fractal analysis, fractal dimension.

# Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 681.518.3

doi: 10.26906/SUNZ.2021.3.018

В. В. Верховський<sup>1</sup>, І. В. Захарченко<sup>2</sup>, Р. В. Тарасов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Льотна Академія Національного Авіаційного університету, Кропивницький, Україна

<sup>2</sup>Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків, Україна

<sup>3</sup>Військова частина А0799, Київ, Україна

## РОЗРОБКА МОДЕЛІ НАВЧАЄМОГО ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТРЕНАЖЕРНОЮ ПІДГОТОВКОЮ ПІЛОТІВ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ

**Анотація.** В статті розглянуто процес створення моделі навчаємого, як однієї з складових автоматизованої системи керування тренажерною підготовкою пілотів цивільної авіації. Проаналізовано існуючі методи побудови моделі навчаємого та особливості їх реалізації, а саме: оверлейну, пертурбаційну, різнищеві моделі. Визначено компоненти моделі навчаємого, особливу увагу приділено компоненту - психологічному профілю особистості. З урахуванням специфіки льотної діяльності в психологічний профіль особистості моделі навчаємого крім його загальних особистісних якостей запропоновано додатково включити ті характеристики, що можуть впливати на успішність виконання програми тренажерної підготовки і обумовлені структурою та змістом діяльності пілота при експлуатації літака. Для визначення цих додаткових якостей проаналізовано опорні фрагменти діяльності пілотів і фактори, що необхідні для їх успішної реалізації. Запропоновано структуру моделі навчаємого, яка побудована з урахуванням психологічних аспектів особистості, які впливають на льотні здібності та їх розвиток

**Ключові слова:** модель навчаємого, тренажерна підготовка, авіаційний тренажер, психологічний профіль особистості.

### Вступ

**Постановка проблеми/** Аналіз статистичних даних щодо безпеки польотів свідчить, що значна частина авіаційних подій (75%) обумовлена людським фактором, з яких майже половина пов'язана з недоліками у професійній підготовці авіаційних фахівців [1].

Незважаючи на те, що принципи льотної підготовки майже не змінилися, сучасні умови вимагають модифікації існуючих підходів до професійної підготовки майбутніх пілотів і застосування нових підходів до навчання з використанням сучасних інформаційних технологій. Специфічним етапом професійної підготовки майбутніх пілотів є тренажерна підготовка, першочерговою задачею якої традиційно вважалося формування автоматизованих сенсорних дій рефлекторного рівня. По мірі удосконалення систем управління сучасними повітряними суднами зростає роль та значення індивідуальних важливих професійних якостей льотної складу, що вимагає внесення відповідних коректив до професійної підготовки майбутніх пілотів. Формування та розвиток професійних навичок потребує значних часових та фінансових витрат. Застосування автоматизованих технічних засобів навчання в таких умовах дозволяє підвищити зменшити витрати на підготовку та ефективність процесу навчання (якість та швидкість) льотної складу за рахунок можливості забезпечення всіма видами необхідної навчальної інформації, контролю результатів та формуванню індивідуальної траєкторії навчання з урахуванням особливостей пілота.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням побудови автоматизованих систем навчання із застосуванням моделей навчаємого, які враховують індивідуальні особливості для формування індивідуальної траєкторії навчання присвячено багато робіт, наприклад [2]. Питання, присвячені особливостям ефективної організації тренажерної підготовки наведені в роботах [3-4]. Недостатньо розглянуті питання, пов'язані з побудовою моделі навчаємого, саме з точки зору специфіки льотної діяльності та особливостей процесу тренажерної підготовки.

**Метою статті** є обґрунтування та розробка моделі навчаємого з урахуванням специфіки льотної діяльності як складової автоматизованої системи керування тренажерною підготовкою пілотів цивільної авіації.

### Виклад основного матеріалу

Тренажерна підготовка є важливим засобом професійної підготовки льотної складу і має суттєвий вплив на формування у пілота навиків і умінь взаємодії з повітряним судном в умовах впливу внутрішніх та зовнішніх факторів. Вона є попереднім етапом льотної діяльності і вирішує завдання формування готовності майбутнього пілота до виконання льотної практики, використовуючи для цього різноманітні засоби та методи діагностики та корегування професійно важливих якостей.

Розвиток сучасних інформаційних технологій надає можливість розширити коло можливостей у сфері навчання. Розглянемо процес тренажерної підготовки з точки зору складної системи. Так, об'єктом керування в такій системі є навчаємий

(слухач), а в якості керуючого пристрою – автоматизована система керування тренажерною підготовкою (АС КТП). Виділимо певні риси, що характерні в даному випадку для об'єкта керування:

- індивідуальність процесу навчання для кожного об'єкта обумовлює стохастичність поведінки навчаємого;
- відсутність математичної опису навчаємого;
- варіювання характеристик навчаємого, що обумовлено нестаціонарністю складного об'єкта керування.

Вказані фактори свідчать про необхідність створення моделі навчаємого.

Згідно [2] моделювання знань про навчаємого виконується з наступними цілями:

- встановлення того, який він є, тобто його поведінкова модель за допомогою засобів діагностики;
- встановлення того, яким ми хочемо його бачити, тобто стандартна нормативна модель, яка містить необхідні вимоги для майбутнього фахівця і яка порівнюється з поведінковою моделлю;
- встановлення того, яким він може стати, наприклад з урахуванням моделі компетенцій.

Виділяють декілька підходів до створення моделі навчаємого. Згідно [2] під моделлю користувача розуміють сукупність його параметрів (характеристик), а також набір правил, які у відповідності до цих параметрів керують процесом спілкування системи з користувачем. Інший підхід передбачає, що модель навчаємого - це сукупність параметрів, що вимірюються певним чином в процесі роботи з навчаємим і які визначають ступінь засвоєння ним навчального матеріалу. При створенні моделі будемо керуватися першим підходом тому, що відсутність методів та способів роботи з параметрами навчаємого значно звужує можливості АС КТП.

Правила повинні корегувати модель навчаємого за результатами його роботи з системою, що дозволить викладачу (інструктору) здійснювати алгоритмічне налаштування моделі, тобто керувати моделлю.

Модель навчаємого містить у собі наступну інформацію: цілі навчання, поточний стан процесу навчання, особливості подання навчального матеріалу та вибору перевірюваних завдань та правила корегування моделі за результатами роботи навчаємого [2].

Серед цілей тренажерної підготовки є набуття, підтримка або удосконалення практичних умінь по діям екіпажу в різних умовах та в особливих випадках у польоті.

Поточний стан процесу навчання по суті являє собою проекцію теоретичної підготовки слухача на модель предметної області і містить відомості щодо результатів засвоєння слухачами теоретичних дисциплін навчального плану. Використання такої моделі дозволить здійснювати адаптивне управління тренажерною підготовкою.

Далі проведемо аналіз існуючих методів побудови моделі навчаємого. Серед простих методів виділимо оверлейну модель, яка базується на положенні, що структура знань навчаємого та системи є

аналогічними і знання навчаємого є підмножиною знань системи. Ступінь засвоєння знань з певної теми позначається за допомогою деякого атрибуту, який визначається в процесі тестування.

Більш складною є різницева модель [2]. В процесі побудови моделі система аналізує відповіді навчаємого з еталонними, які закладені в системі. Ця різниця є основою побудови моделі, при цьому існує можливість урахування не тільки відсутність певних знань у навчаємого, але й їх невірне застосування.

Ще одна альтернатива – пертурбаційна модель [2], передбачає, що структура знань користувача і системи можуть не співпадати. В даному випадку важливим елементом є визначення причини розходження в знаннях для запобігання невизначеності моделі. Серед таких причин можуть бути: недостатній об'єм знань, неухважність, невірне використання знань, невірні знання, відповіді навчання тощо.

Більш гнучкою є мережева оверлейна модель, що являє собою граф, вершини якого відображають поняття та (або) уміння, а дуги - відношення між ними. Кожній вершині та дузі ставиться у відповідність величина або множина величин, які характеризують ступінь володіння навчаємим даним поняттям або умінням з допустимим наслідуванням вершин.

Визначимо компоненти моделі навчаємого (MOD):

облікові дані навчаємого (базовий профіль) ( $D_1$ ),

психологічне профіль особистості (психологічний профіль) ( $D_2$ ),

вхідний рівень знань та умінь навчаємого ( $Z_{noc}$ ),

вихідний рівень знань та умінь ( $Z_{вих}$ ),

методи виявлення знань та умінь ( $A$ ),

методи психологічного тестування ( $A_{псих}$ ) на основі яких встановлюється психологічне профіль навчаємого.

Термін "знання" включають у себе два компоненти: декларативні (теоретична підготовка) та процедурні знання (рішення практичних задач).

Базовий профіль має наступний вигляд:

$$D_1 = \langle P, K, Z_{ex} \rangle \quad (1)$$

де  $P = (p_1, \dots, p_n)$  - множина персональних даних навчаємого (ПІБ, навчальна група, спеціальність, вік, стать тощо),  $K$  - кваліфікація навчаємого (у даному випадку мається на увазі рівень наявної класної кваліфікації пілота або її відсутність для курсантів),  $Z_{ex} = (z_1, \dots, z_m)$  - вхідний рівень знань, під яким мається на увазі множина результатів теоретичної підготовки.

На рис. 1 наведено типову схему організації та проведення підготовки на тренажері.

Далі розглянемо більш детально компоненту моделі - психологічне профіль особистості ( $D_2$ ).

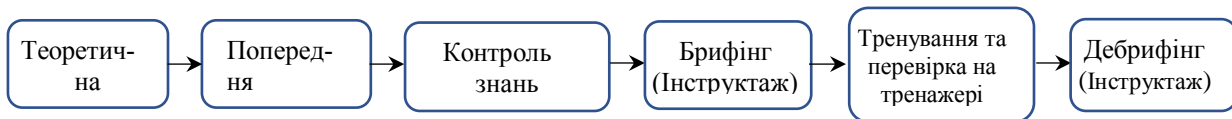


Рис. 1. Схема підготовки на тренажері

Індивідуальність характеризується сукупністю інтелектуальних, вольових, моральних, соціальних та інших рис особистості, які помітно відрізняють дану людину від інших людей. До індивідуальних особливостей відносяться своєрідність відчуттів, сприйняття, мислення, пам'яті, уяви; особливості інтересів, нахилів, здібностей, темпераменту, характеру особистості. Необхідність індивідуального підходу обумовлена можливістю впливу на особистість через її індивідуальні особливості, через «внутрішні умови», без урахування яких неможливий посправжньому дієвий навчально-виховний процес [5].

З урахуванням специфіки льотної діяльності в психологічне профіль особистості моделі навчального крім вищезазначених загальних особливостей необхідно додатково включити ті якості, що сприяють успішному виконанню програми тренажерної підготовки, обумовлені структурою та змістом діяльності пілота при експлуатації літака.

Для визначення цих додаткових якостей скористаємось дослідженнями авторів [6], якими було виділено опорні фрагменти діяльності пілотів (ОФД) з урахуванням широкого використання високоавтоматизованих повітряних суден. При цьому критеріями відбору таких ОФД були: частота зустрічі фрагмента діяльності, інтенсивність діяльності та стійкість. Далі наведемо перелік вказаних ОФД за ступенем їх пріоритетності:

1. Оперування системою управління польотом.
2. Прийняття рішень.
3. Комунікація.
4. Ручне пілотування.
5. Вибір необхідних стандартних процедур.
6. Дії з обладнанням в кабіні.

Аналіз вказаних ОФД дозволяє стверджувати, що ОФД 1,2,5 є похідними дій на основі професійних знань та досвіду; ОФД 4 та 6 – крім вищеперахованих дій потребують відпрацювання шляхом багатократного повторення та застосування методів вироблення процедурних знань; ОФД 6 потребує спеціальних знань та навиків і що є особливо важливим виховання та розвитку таких якостей як здатність взаємодіяти та спілкуватися, організаторські здібності тощо.

Здатність приймати своєчасні та безпомилкові рішення є однією з важливих характеристик професійної діяльності пілота.

До числа таких умов відносяться: наявність факторів ризику, висока психологічна "ціна" діяльності, ускладнення функцій оператора, розширення діапазону швидкостей процесів, що управляються, збільшення темпу діяльності, монотонність роботи в умовах очікування сигналу до дії, поєднання різних по цілі дій в одній діяльності, переробка великих об'ємів і потоків інформації (перенавантаження ін-

формацією), дефіцит часу на виконання необхідних дій, складна динаміка зміни функціональних станів, виникнення аварійних ситуацій, нестача інформації (сенсорний голод), обмеження рухової активності (професійна гіпокінезія) тощо [5].

Велике значення має формування моральних, вольових та інших характерологічних якостей особистості, зокрема ступінь розвитку почуття відповідальності.

Одним з найбільш розповсюджених факторів, що впливають на прийняття рішення оператором є дефіцит часу або обмежений ліміт часу. Професія пілота вважається однією з найбільш "швидкісних" операторських професій. Крім того дефіцит часу є однією з суттєвих характеристик аварійних ситуацій. Мінімальні та максимальні значення часу прийому та обробки інформації про аварію в реальному польоті складають: час визначення аварії: 0,2 - 0,4 секунди, час на прийняття рішення 1,2 - 15 секунд. Згідно моделі діяльності оператора АСК, що запропонована В.П. Зінченко [4] ситуація дефіциту часу описується виразом, складовими якого є наступні:

$t_1$  - час прийому інформації оператором,

$t_2$  - час обробки інформації оператором,

$t_3$  - час на виконання керуючого впливу.

При цьому ситуація дефіциту часу описується як

$$\sum t_i < T,$$

де  $T$  - заданий граничний час.

Серед множини факторів, що впливають на складову  $\sum t_i$  визначимо ті, що стосуються особистості пілота, а саме:

1. Недостатня навченість, несформованість професійних знань, умінь та навичок.

2. Несприятливий функціональний стан людини (наприклад втомленість).

3. Психічна напруженість, що сприяє до емоційно-моторним, емоційно-сенсорним та емоційно-інтелектуальним порушенням.

4. Індивідуально-психологічні особливості процесів сприйняття, мислення, моторних компонентів, деякі з них є типологічно обумовленими.

5. Позитивні та негативні особистісні характеристики людини. До першої групи можна віднести надлишкове почуття відповідальності за наслідки своїх дій, що зазвичай призводить до надлишкової обережності, відчуття недопустимості помилок, почуття невпевненості в своїх силах, негативна мотивація щодо даного виду діяльності.

Далі розглянемо деякі аспекти психічних процесів в діяльності авіаційних спеціалістів. Одним з найбільш важливих психічних процесів є пам'ять. В процесі роботи пілота необхідно користуватися великим об'ємом інформації, яка знаходиться в опера-

тивній (інформація щодо прогнозу погоди на зльоті, маршрут, поточні параметри польоту, інформація від авіадиспетчера тощо) та довгострокової пам'яті (технологія роботи, призначення авіаційних приладів).

Невід'ємною умовою успішного засвоєння льотної спеціальності є високий рівень інтелектуальних здібностей. До найбільш важливих складових таких здібностей відносять: мислення, рівень розвитку просторових уявлень, здатність до системного аналізу та прогнозування. Мислення, у свою чергу володіє такими якостями як: критичність, гнучкість, глибина, гострота, швидкість, самостійність.

Зазвичай структура особистості включає наступні складові: темперамент, характер, здібності, вольові якості, емоції, мотиви, соціальні установки, потреби, які можуть бути діагностовані за допомогою тих чи інших засобів.

Однією з визначальних сторін особистості авіаційного фахівця є його мотиваційна сфера та сфера потреб [5]. Саме ці особливості є необхідною умовою засвоєння будь якої професійної діяльності та визначають характер і функціонально-енергетичний рівень відповідної діяльності.

Не менш важливою є емоційно-вольова сфера. Це пов'язано з тим, що емоції впливають на множинну мозкових систем, що регулюють поведінку людини, процеси сприйняття та вилучення інформації з пам'яті, вегето-судинні функції організму. У випадку виникнення аварійних ситуацій емоційна напруга може викликати імпульсивні дії (неправильний вибір кнопок та тумблерів) або навпаки уповільнення або пропуск дій, як результат виникнення гальмівної реакції.

Розрізняють три типи емоційної напруженості з точки зору впливу на процес льотної навчання [5]:

1. Незначна напруга, яка швидко зникає і не впливає на процес льотної навчання.
2. Довга та виражена напруга, яка впливає на процес навчання, але підлягає корекції за допомогою спеціальних тренувань
3. Довга та виражена напруга, яка не підлягає корекції і є основою для відрахування курсанта.

Реальну небезпеку являють собою другий та третій типи.

Наступним компонентом особистості є темперамент, який є стійкою властивістю, на відміну попередніх, які підлягають корегуванню та розвитку в процесі діяльності. Особливості темпераменту особливо проявляються під час стресових ситуацій і впливають на професійну придатність, яка характеризується швидкою зміною алгоритмів роботи в умовах великої кількості інформації і потребує швидкого реагування та своєчасного прийняття рішення. Темперамент виражається в силі, рухливості та урівноваженості нервових процесів, визначає стійкість оператора до емоційної напруги [1]. Так меланхолік характеризується підвищеною емоційністю, вразливістю, що може призвести до імпульсивних або гальмівних дій. Інертність флегматиків в умовах швидких змін повітряної обстановки може

привести до різкого гальмування його психічних процесів, розгубленості. Холерики характеризуються надлишковим оптимізмом та самовпевненістю, що може спричинити переоцінку своїх можливостей та привести до аварійної ситуації. Безпечність та поверхневність сангвініка може створювати умови неадекватного сприйняття дійсності.

Вказані особливості свідчать про особливе значення та необхідність встановлення та врахування типу темпераменту, а також проведенні додаткової роботи з метою корекції його окремих особливостей.

Характерологічні особливості (характер) особистості також проявляються у різних видах діяльності. Вони надають можливість з деякою долею вірогідності прогнозувати дії авіафахівця у певних ситуаціях.

Здібності також є важливим елементом, який проявляються в умінні ефективно виконувати певний вид діяльності. Існують тільки у розвитку і не можуть виникнути поза межами певної діяльності. В основі здібностей лежать задатки – структура, що починає реалізовуватись при перших спробах діяльності. провідною є здатність до навчання.

Слід зазначити, що курсанти, які відрізняються множиною індивідуально-психологічних якостей можуть однаково успішно засвоювати професію пілота. Цей факт пов'язаний з компенсаторними можливостями організму, тобто деякі негативні риси не стають суттєвою завадою, у випадку, якщо вони компенсовані відповідними позитивними якостями.

Далі перерахуємо ті фактори, що сприяють успішному освоєнню льотної діяльності [7]:

1. Психічне та соматичне здоров'я, емоційна стійкість та висока завадостійкість.
2. Висока мотивація освоєння льотної спеціальності.
3. Позитивні якості уваги, пам'яті та мислення.
4. Розвинуте почуття часу, особливо мікроінтервалів.
5. Швидкість та точність рухових реакцій.
6. Здатність швидко та очно орієнтуватися у просторі.
7. Здатність до антиципації (передбачення) подій.

У процесі виконання польоту пілот взаємодіє не лише з технікою, а й з іншими членами екіпажу.

Надійність та ефективність діяльності екіпажу залежать не тільки від індивідуальних якостей та професійного досвіду спеціаліста, але й від злагодженої участі всіх в загальній справі та від особистісних відносин в екіпажі.

Отже комунікативні уміння мають значний вплив на ефективність під час вироблення та прийняття рішень у процесі льотної експлуатації повітряного судна як у стандартних так і в особливих ситуаціях польоту [8].

При проведенні перевірки на тренажері інструктор (інструктор - екзаменатор) оцінює, в тому числі, і дії екіпажу в цілому. Якщо дії або бездіяльність

члена екіпажу робить негативний вплив на безпеку польоту, то можливе прийняття рішення про додаткову підготовку.

Серед професійно-важливих якостей майбутнього пілота зазначимо наступні:

- уміння побудувати концептуальну модель образу польоту на основі аналітичних даних;

- уміння виконати селекцію робочих гіпотез можливих дій та прогнозувати розвиток ситуації;  
- уміння прийняти єдине вірне рішення;  
- уміння в думках відтворювати образ діяльності, прийняти та реалізувати рішення.

Далі, в табл. 1 представимо параметри моделі навчаємого.

Таблиця 1 – Параметри моделі навчаємого

Тип даних	Профіль	Характеристики
Статичні	Базовий профіль	Персональні дані
		Спеціальність
		Кваліфікація
		Рівень теоретичних знань
	Особистісний профіль	Особливості ВНД
		Особливості пізнавальних процесів
		Характер
		Професійна мотивація
Динамічні		Комунікативні уміння
		Завдання навчання
		Сценарій тренажерної підготовки
		Результати відпрацювання попередніх задач
		Результати контролю (екзамену)
		Набуті навички

Табл. 1 містить як незмінювані дані (статичні), так і змінювані (динамічні), тобто ті, що постійно корегуються в процесі проведення тренажерної підготовки. На основі даних з таблиці 1 представимо модель навчаємого у вигляді структури з множиною статичних та динамічних елементів як складової АС КТП (рис. 2). Більшість автоматизованих систем, що містять модель навчаємого побудовані за строго прописаним алгоритмом та визначеним способом побудови самої моделі. В такому випадку модель навчаємого визначається тими параметрами, які обрані розробником для побудови моделі і які система спроможна розраховувати [8]. Цей підхід є досить розповсюдженим, але при цьому система не володіє гнучкістю і має обмеження з точки зору можливостей користувача по її налаштуванню. Альтернативним варіантом є забезпечення можливості задання довільної множини параметрів та алгоритму поведінки системи в залежності від їх значень.

Формування моделі навчаємого може здійснюватися "з нуля", що передбачає відсутність будь-яких знань щодо навчаємого і потребує певного часового інтервалу.

Другий підхід – визначення вихідної моделі перед початком роботи системи.

Умовою для визначення системою вірних керуючих впливів є наявність мети тренажерної підготовки, яку повинен досягти навчаємий та критерії, згідно яких оцінюється ступінь досягнення поставлених цілей.

Представлена модель дозволяє зберігати всю множину даних, що необхідна для аналізу та індивідуалізації процесу тренажерної підготовки.

## Висновки

Тренажерна підготовка є важливим етапом професійної підготовки льотного складу, який сприяє успіхам льотного навчання, формуванню високої надійності пілота в різних умовах обстановки.

Застосування сучасних повітряних суден з високим рівнем автоматизації збільшує роль та значення індивідуальних важливих професійних якостей льотного складу і потребує їх урахування в процесі професійної підготовки.

Актуальним в таких умовах є застосування автоматизованих систем керування тренажерною підготовкою, в яких важливою складовою є модель навчаємого, яка враховує індивідуальні особливості особистості і на їх основі дозволяє формувати індивідуалізовану траєкторію проведення тренажерної підготовки.

В роботі визначено основні складові моделі навчаємого.

Особлива увага приділяється психологічному профілю особистості, який враховує ті характеристики особистості, які безпосередньо впливають на успішність проходження тренажерної підготовки і обумовлені специфікою льотної діяльності та ґрунтуються на дослідженнях інженерної та авіаційної психології.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку структури автоматизованої системи керування тренажерною підготовкою, ключовим елементом якої є модель навчаємого.

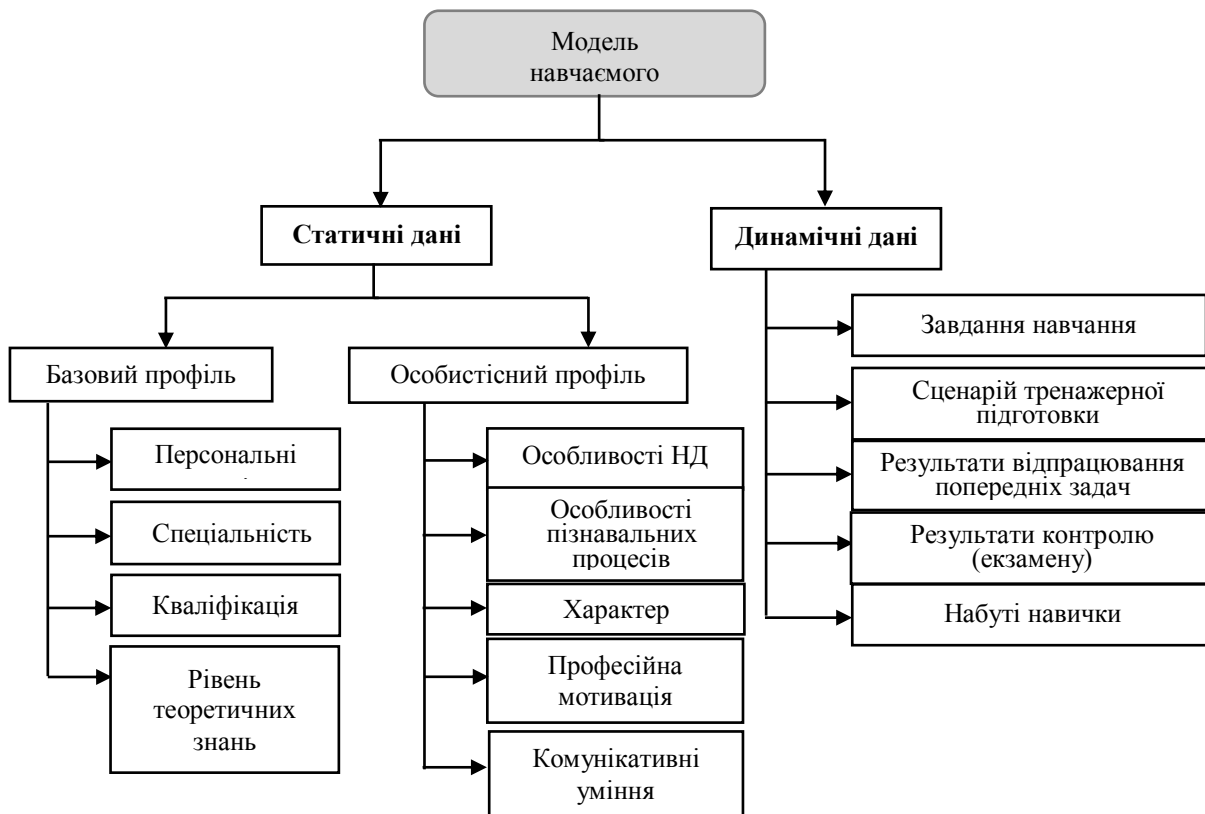


Рис. 2. Структура моделі навчасмого для АС КТП

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Овчаров В.Е. Человеческий фактор в авиационных происшествиях. – М.: МАК, 2005.
2. Рыбина Г.В. Обучающие интегрированные экспертные системы: некоторые итоги и перспективы / Г.В. Рыбина // Искусственный интеллект и принятие решений, 2008. – №1. – С.22 – 46.
3. Потапов А. Н. Системный анализ модели организации тренажной подготовки операторов сложных эргатехнических систем / А. Н. Потапов, В. В. Черников // Системный анализ и информационные технологии, 2012. – № 1. – С.28 – 34.
4. Картамышев П. В. Методика летного обучения / П. В. Картамышев, М. В. Игнатович, А. И. Оркин. – М.: Транспорт, 1987. – 278 с.
5. Авиационная психология и человеческий фактор: учеб.-метод. пособие / Д.А. Евстигнеев. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2005. –103 с.
6. Задкова О. Особливості комунікативної взаємодії пілотів у процесі вирішення проблемних ситуацій як складова професійної надійності / О. Задкова, О. Бродова // Вісник Національного авіаційного університету. Серія: Педагогіка, психологія. 2018. – № 12. – С.1–5.
7. Семак О.О. Основы инженерной психологии: Навчально-методичний посібник – Івано-Франківськ: Плай, 2006. – 106 с.
8. Казачкин Б. И. Авиационные тренажеры как связующее звено между наземной и летной подготовкой / Б.И. Казачкин. – Монино, 1999. – 160 с.

Received (Надійшла) 30.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.08.2021

**Development of a trainer model for automated control system for civil aviation pilots simulator training**

V. Verkhovsky, I. Zakharchenko, R. Tarasov

**Annotation.** The article discusses the process of creating a student model as one of the components of an automated control system for civil aviation pilots simulator training. The existing methods of constructing a student's model and the peculiarities of their implementation are analyzed, namely: overlay, perturbation, difference models. The components of the student's model are determined, special attention is paid to the component - the psychological profile of the personality. Taking into account the specifics of flight activity, in the psychological profile of the personality of the student's model, in addition to his general personal qualities, it is proposed to additionally include those characteristics that can affect the success of the simulator training program. They are due to the structure and content of the pilot's activity during the operation of the aircraft. To determine these additional qualities, the supporting fragments of the pilots' activities and the factors necessary for their successful implementation were analyzed. The structure of the student's model is proposed. It is built taking into account the psychological aspects of the personality that affect the flying ability and their development.

**Keywords:** student's model, simulator training, aviation simulator, psychological profile of a personality.

О. А. Дакі, Н. С. Урум, В. М. Федунів, О. В. Бажак

Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна

## МЕТОДИ МОРЕХІДНОЇ АСТРОНОМІЇ В СУЧАСНОСТІ

**Анотація.** На теперішній час методи і засоби морехідної астрономії є єдиними дублюючими стосовно глобальних навігаційних супутникових систем. Морехідна астрономія оперує методами та засобами для визначення місця судна у відкритому морі. З розвитку сучасних інформаційних технологій почалася інтенсивна розробка комп'ютерних методів в астронавігації. Широке використання в сучасній навігаційній практиці новітніх супутникових систем обсервації ніяк не знімає актуальності методів астрономічних обчислень. Астрономічні способи визначення мають істотні переваги, а саме – небесні світила є природними "датчиками" навігаційної інформації, причому їх досить багато, що дозволяє одночасно вести вимір для розрахунку елементів декількох ізостадій. Триваюче швидке ускладнення умов судноводіння, особливо в районах інтенсивного судноплавства, стимулює розвиток автоматизованих навігаційних комплексів, які реалізують зазначені методи морехідної астрономії. Астрономічні методи можуть бути автоматизовані за допомогою астронавігаційних систем, що значно збільшить ймовірність застосування цих методів, скоротить час і підвищить точність рішення навігаційних завдань. В статті наведена структурно-функціональна схема автоматизованої астронавігаційної системи.

**Ключові слова:** астронавігаційна система, морехідна астрономія, навігація, судноводіння.

### Вступ.

Морехідна астрономія має значний шлях розвитку. Ще до 70-х років ХХ століття її методи залишалися основними для океанських визначень місцеположення судна. Наукові дослідження цього періоду зосереджувалися в основному на розробці математичних моделей узагальненого способу отримання ліній положення, методів попередніх обчислень та астрономічних таблиць.

З розвитку сучасних інформаційних технологій почалася інтенсивна розробка комп'ютерних методів в астронавігації. Широке використання в сучасній навігаційній практиці новітніх супутникових систем обсервації ніяк не знімає актуальності методів астрономічних обчислень. Астрономічні способи визначення мають істотні переваги, а саме – небесні світила є природними "датчиками" навігаційної інформації, причому їх досить багато, що дозволяє одночасно вести вимір для розрахунку елементів декількох ізостадій. Небесні світила забезпечують можливість визначення координат судна в будь-якій частині Світового океану. Астрономічні способи визначення місця судна є автономними; практично немає засобів, які позбавлять судно можливості астрономічних обсервацій при виведенні з ладу електрообладнання.

У морському плаванні основним є штурманський метод судноводіння, який складається в регулярному визначенні місцеположення судна. Результати обчислень показують положення судна щодо небезпек, слугують для контролю та корекції визначення місцеположення. В усіх випадках навігаційна безпека плавання залежить, насамперед, від частоти та точності визначень місця, унаслідок чого визначення місця судна відносять до основних задач навігації. Серед багатьох та різноманітних заходів, спрямованих на підвищення безпеки мореплавання, помітна роль належить удосконаленню теорії й практики визначення місцеположення судна. Теорія визначення місцеположення судна за допомогою астрономічних обсервацій створювалася і розвива-

лася зусиллями багатьох поколінь моряків і вчених різних країн. На жаль, з розвитком системи супутникового позиціонування увага до методів морехідної астрономії почала різко знижуватися. Основна роль морехідної астрономії в сучасних реаліях – це залишатися автономною резервною системою визначення місця судна, що здатна забезпечити безпеку мореплавання в умовах відкритого моря.

Прогрес у морехідній астрономії в області підвищення точності обсервацій по зірках та інших світилах можливий шляхом розвитку методів морехідної астрономії.

**Метод статті** є аналіз методів морехідної астрономії та розробка структурно-функціональної схеми автоматизованої суднової структурно-функціональної схеми автоматизованої астронавігаційної системи.

**Аналіз публікацій.** Слід зауважити, що методи морської астрономії втратили свою популярність з розвитком систем супутникової навігації, а кількість публікацій щодо даної тематики невпинно падає.

Важливим є дослідження кінця ХХ – початку ХХІ століття Міщика М. О. [1], Малкова О. О. [2]. Сучасні дослідження процесів автоматизації рішення завдань морехідної астрономії представлені в роботах Свешнікова М. Л. [3], Лукашової М. В. [4]. Додатковими джерелами є монографії, підручники та посібники з морехідної астрономії вітчизняних та закордонних спеціалістів [5-8].

### Основна частина

На теперішній час використання інформаційних технологій та елементів цифрової техніки має особливе значення в системах комплексної суднової автоматизації, у тому числі й у системі автоматизації процесів судноводіння.

Проблема автоматизації процесів судноводіння містить у собі три основних напрямки: отримання навігаційної інформації, обробку навігаційної інформації, управління судном як об'єктом автоматичного регулювання. Кожний з цих напрямків містить різні проблеми, деякі з яких вирішені, багато яких



вирішуються, інші чекають свого рішення. У питаннях обробки навігаційної інформації можна відзначити, що створення єдиної методології розрахунку ліній положення та розрахунку координат судна значно спростить обробку азимутальних, швидкісно-висотних та швидкісно-азимутальних способів визначення місцеположення судна. Незважаючи на розвиток супутникових систем навігації, астрономічні способи визначення місцеположення не втратили свого значення для забезпечення навігаційної безпеки плавання [8]. Навіть при подальшому розвитку глобальних навігаційних систем автономні астрономічні способи визначень місцеположення надовго залишаться як резервні через надійність секстанта й хронометра. А для визначення поправки компаса у відкритому морі поки не існує інших способів.

Диференціальні методи морехідної астрономії відкривають можливість визначення місцеположення за короткостроковими спостереженнями одного світила, що здійснюється на протязі 5-10 хвилин.

При достатній точності інструментально-вимірювальних засобів (порядку 3') вони здатні забезпечити середньоквадратичну помилку положення  $\pm 500$  м.

Подібна порівняно висока точність разом з відзначеною перевагою диференціальних методів вимагає уваги до різних аспектів питання, наприклад, загальної методології визначення місцеположення, принципів її інструментально-технічного здійснення, обґрунтування раціональних інженерно-конструкторських рішень. Протягом тривалого часу морехідна астрономія розвивалася без принципових змін, шляхом удосконалення інструментарію, створення радіосекстанів, що через їх складність й вартість поки широко не застосовуються на малих комерційних судах. Найбільш істотні зміни пов'язані з використанням обчислювальної техніки.

У розвитку морехідної астрономії виявляються такі тенденції: розробка алгоритмів для електронно-обчислювальних машин та способів прискореної обробки спостережень; дослідження та зменшення впливу систематичних і грубих похибок вимірів; відмова від неефективних часткових способів, наприклад, із наближеними меридіональними висотами. Швидкості суден, що збільшуються, і щільність судноплавних потоків загострюють дефіцит часу на капітанському містку. Цим обумовлений зростаючий інтерес не тільки до автоматизації, але й до методів прискореної обробки астрономічних спостережень.

Як показує практика [1, 7, 8], значна частина функціональної діяльності судноводія пов'язана з виконанням різних, у тому числі досить складних, обчислень. Унаслідок цього капітан та штурман у своїй практиці широко користуються спеціальними таблицями, номограмами, графіками та іншими посібниками, що трохи полегшують і спрощують їх працю. Далеко не завжди використання посібників дозволяє вирішувати задачі морської астрономії швидко й безпомилково. У відповідності з дослідженням [7], з 405 задач з астрономії, виконаних

судноводіями середньої кваліфікації, помилки були допущені в 184 випадках. Таким чином, імовірність помилки при рішенні досягає 0,45. Очевидно, що на допомогу судноводію повинні прийти прості та зручні у використанні інформаційно-обчислювальні системи, спеціально розроблені або пристосовані для рішення навігаційних задач. На ряді суден уже зараз впроваджені автоматизовані навігаційні комплекси, які звільняють судноводія від багатьох обчислювальних операцій [3, 4].

При виборі методу та розрахункових алгоритмів необхідно, по-перше, максимально спростити введення вхідних даних, підвищити наочність та інформативність отриманих результатів. По-друге, намагаються уникнути вставок у програмне забезпечення та її доповнення з покроковими розрахунками, а також необхідність запису проміжних результатів з подальшим їх введенням. Нарешті, по-третє, бажано уникнути необхідності аналізу знаків у процесі розрахунків, використання різних правил, таблиць та діаграм.

При цьому можлива відмова від загальноприйнятого методу формування ліній положення та пов'язаної з ним графічної прокладки цих ліній. Замість ліній положення (дотичних) безпосередньо розглядаються вихідні ізолінії-ізостадії – малі кола на небесній сфері з радіусами, які дорівнюють вимірним навігаційним параметрам – висотам світил  $h_{o1}$  та  $h_{o2}$  [9].

По-перше, відпадає необхідність у досить складному розрахунку зчислених значень висот  $h_{c1}$  та  $h_{c2}$ .

По-друге, усувається принципова похибка від заміни ізоліній (дуг кривих) їх лініями положення (дотичними до цих дуг). На цю принципову погіршеність накладається похибка самої графічної побудови.

У результаті обсервоване місце судна  $M_o$ , як точка перетину ізоліній, буде набагато ближче до істинного місця, ніж точка перетину дотичних до ізоліній (ліній положення).

Сумарна похибка при цьому може досягти декількох миль. При створенні програмного забезпечення метод ітерацій зручно використовувати при визначенні місця судна по висотах двох зірок (або зірки й планети).

Для цього в рівняння ізоліній-ізостадій (кола рівних висот)

$$z_1 = (90^\circ - h_1) = \text{const} \quad \text{та} \quad z_2 = (90^\circ - h_2) = \text{const}$$

підставляються координати  $(\sigma_{1,2}; t_{1,2})$  та обсервовані висоти  $h_{1,2}$  обох зірок.

Тоді має місце система двох рівнянь щодо шуканих обсервованих координат  $\varphi_0$  та  $\lambda_0$ :

$$\begin{cases} \sin h_{o1} = \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0 \cdot \cos \delta_1 \times \\ \quad \times \cos(t_{rp1}^* \pm \lambda_{W0}^E); \\ \sin h_{o2} = \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0 \cdot \cos \delta_2 \times \\ \quad \times \cos(t_{rp2}^* \pm \lambda_{W0}^E). \end{cases}$$

На перший погляд система не складна: два рівняння та дві невідомі. Однак вони є функціями різних тригонометричних функцій, отже необхідно використати метод ітерацій (послідовних наближень).

Геометрично ітераційний процес має такий вигляд: у кожній наступній точці уточнюється одна з координат, наприклад, спочатку широта  $\varphi$ , а потім довгота  $\lambda$ .

На основі вищевикладеного можна зробити такий висновок про існування двох основних шляхів підвищення ефективності використання методів морехідної астрономії:

- збільшення кількості вимірюваних астронавігаційних параметрів;
- використання спеціальних технічних засобів вимірів та їх обробки.

Таким чином, можна зробити висновок про необхідність розробки сучасних астронавігаційних систем (АНС) для морських суден, що дозволять автоматизувати процес вимірювання астронавігаційних параметрів.

Побудова суднової АНС повинна бути заснована на таких принципах:

- 1) універсальність, компактність, придатність установки на судні будь-якого призначення;
- 2) забезпечення максимуму ймовірності автоматизованого виміру одночасно декількох астронавігаційних параметрів;
- 3) використання при побудові комплектуючих, вже освоєних промисловістю;
- 4) застосування модульної конструкції, що дозволяє варіювати функціональними можливостями;

5) математичне забезпечення АНС повинне дозволити вирішувати завдання морехідної астрономії автоматично, без залучення додаткових таблиць, з можливістю автоматизованого періодичного відновлення астрономічних координат;

- 6) простота інтерфейсу;
- 7) можливість комплексування з іншими судовими навігаційними приладами та системами;
- 8) вартість серійної судовий АНС повинна бути прийнятною для судновласників й судноплавних компаній.

АНС повинна вирішувати такі завдання:

- 1) автоматичне формування площини штучного істинного горизонту;
- 2) розрахунок екваторіальних та горизонтних координат світил з метою наведення на світило вимірювального пристрою;
- 3) наведення на світило вимірювального пристрою та вимір астронавігаційних параметрів як в оптичному діапазоні, так і по радіовипромінюванню;
- 4) обробка всієї вимірюваної астронавігаційної інформації в реальному масштабі часу, відображення результатів цієї обробки та їх трансляція в системі автоматичного числення;
- 5) визначення місця судна, напрямку географічного меридіана, виправлень систем та приладів курсовказування;
- 6) визначення та збереження точного часу;
- 7) оцінка природного освітлення.

Структурно-функціональна схема автоматизованої суднової астронавігаційної системи наведена на рис. 1.

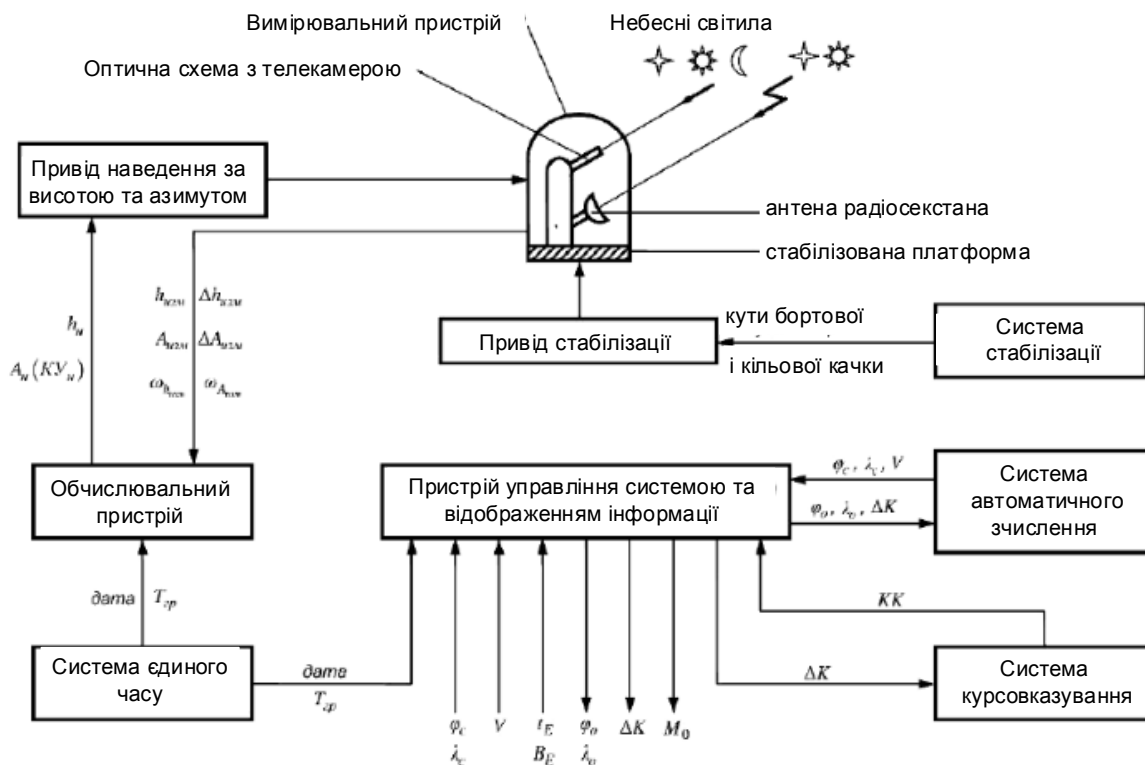


Рис. 1. Структурно-функціональна схема автоматизованої суднової астронавігаційної системи

Сформульовані принципи побудови та задачі суднової АНС, досвід розвитку таких систем дозволяють зробити висновок про такий перелік елементів, які повинні входити до складу автоматизованої суднової астронавігаційної системи (рис. 1):

1) система стабілізації в площині істинного горизонту;

2) вимірювальний пристрій на стабілізованій у площині істинного горизонту платформі;

3) обчислювальний пристрій для обробки астронавігаційної інформації.

Заявлений вище принцип модульності автоматизованої суднової астронавігаційної системи передбачає можливість створення цілого сімейства судових АНС для різних класів судів, що розрізняються за складом обладнання, технічними характеристиками та за вартістю.

Єдиними для таких систем повинні залишатися математичне забезпечення та організація інтерфейсу користувача системи.

### **Висновки**

Теорія та практика визначень місцеположення судна розвиваються спільними зусиллями моряків та вчених, що необхідно для забезпечення безпеки мореплавання.

Статистичні дослідження навігаційної інформації будуть продовжуватися з метою уточнення оцінок похибок та кореляцій, прийнятих у якості апріорних, а також для виявлення залежності таких оцінок від умов вимірів.

Розробка міжнародних вимог до точності судноводіння та прийнята регламентація таких вимог породжують питання про те, які типи судів (їх навігаційне обладнання) і в яких умовах плавання задовольняють названим вимогам, або що треба зробити для їх задоволення.

У розширеній постановці це питання пов'язане з дослідженнями впливу людського фактора, динаміки та траєкторних характеристик суден, а також надійності функціонування полієргатичної системи судноводіння в цілому.

Триваюче швидке ускладнення умов судноводіння, особливо в районах інтенсивного судноплавства, стимулює розвиток автоматизованих навігаційних комплексів, які реалізують зазначені методи морехідної астрономії.

Астрономічні методи можуть бути автоматизовані за допомогою астронавігаційних систем, що значно збільшить ймовірність застосування цих методів, скоротить час і підвищить точність рішення навігаційних завдань.

### **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Мишик Н.А. Сравнительный анализ различных аналитических методов астрономических наблюдений. Новороссийская государственная академия. Новороссийск, 1998. – 26 с.
2. Малков А.А. Развитие методов эфемеридного обеспечения мореходной астрономии. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Институт прикладной астрономии. СПб., 2000 – 388 с.
3. Свешников М.Л., Свешников А.М., Павлов Д.А., Лукашова М.В. Система для решения основных задач мореходной астрономии // Труды ИПА РАН. – 2016. – Вып. 39. – С. 91–97.
4. Лукашова М.В., Свешников М.Л., Парийская Е.Ю., Павлов Д.А. Астронавигационная система «Навигатор» // Труды ИПА РАН. – 2018. – Вып. 46. – С. 87–93.
5. Мореходная астрономия. Основы сферической астрономии. Звездное небо и ориентирование по звездам. Координаты небесных светил. Видимое суточное движение светил : учебно-методическое пособие. – Москва : РКонсульт, 2006. – 164 с.
6. Брусенцов В. П. Лекции по мореходной астрономии. – СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2010. – 120 с.
7. Верюжский Н. А. Мореходная астрономия. – М.: РКонсульт, 2006. – 164 с.
8. Гагарский Д. А. Мореходная астрономия: учебное пособие. – М.: ФГБУ Морречцентр, 2014. – 200 с.
9. Вульфвич Б.А. Основы судовождения. Мурманск, МГТУ, 2008. – 150 с.

Received (Надійшла) 23.04.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 14.07.2021

### **Modern marine astronomy methods**

O. Daki, N. Urum, V. Fedunov, O. Bajak

**Annotation.** At present, the methods and means of nautical astronomy are the only redundant ones for global navigation satellite systems. Naval astronomy operates with methods and means for determining the position of a ship on the high seas. The intensive development of computer methods in astronavigation began with the development of modern information technologies. Modern navigation practice is based on the widespread use of the latest satellite observation systems. However, this in no way diminishes the relevance of astronomical computation methods. Astronomical methods of determining the location of objects have significant advantages. The main one is that it is the celestial bodies that are natural "sensors" of navigation information. The presence of a large number of celestial bodies allows simultaneous measurements to calculate the elements of several isostages. In the modern world, the rapid complication of navigation conditions continues, especially in areas of intensive shipping. This circumstance stimulates the development of automated navigation systems that implement the indicated methods of nautical astronomy. Astronomical methods can be automated using astronomical systems. As a result, the time is significantly reduced and the accuracy of solving navigation problems is increased. The article provides a structural and functional diagram of an automated astronavigation system.

**Keywords:** astronavigation system, nautical astronomy, navigation, navigation.

І. П. Мажара

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

## МЕТОД ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ З ФОРМУВАННЯ ПОТОКІВ ЛІТАКІВ ДЛЯ ЗАХОДУ НА ПОСАДКУ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКИХ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**Анотація.** Розглядається метод прийняття рішення з формування потоків літаків для заходу на посадку з використанням нечітких нейромережових технологій. Подано схему процесу управління повітряним рухом керівника польотів в зоні візуального контролю. Визначені основні схеми формування потоків літаків для заходу на посадку, сформована множина правил яка є початковою базою правил для кожного прикладу, отриманого при формуванні навчальної вибірки за результатами прогнозування варіанту формування потоку літаків, визначаються нечіткі ступені приналежності заданих значень лінгвістичної змінної до відповідних *FOU*, кожному навчальному прикладу ставляться у відповідність ІНМТ2, нечіткі ступені приналежності до яких у відповідних значеннях лінгвістичних змінних є максимальними. **Мета статті:** удосконалення методу прийняття рішення з формування потоків літаків для заходу на посадку з використанням нечітких нейромережових технологій.

**Ключові слова:** формування потоків літаків, управління повітряним рухом, група керівництва польотами, лінгвістична змінна, інтервальна нечітка множина другого типу.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Основною метою розпізнавання варіанту формування потоків літаків (ФПЛ) для заходу на посадку при поверненні на аеродром після виконання бойового завдання є віднесення їх формалізованих описів до відповідних класів. Автоматизація процедур розпізнавання є елементом автоматизації прийняття рішень. За результатами розпізнавання бойових порядків повітряних суден приймають рішення щодо виконання маневрів для побудови єдиного потоку повітряних суден для посадки з метою попередження зіткнень та економічної витрати палива [1].

Специфіка діяльності осіб групи керівництва польотами (ГКрП) при вирішенні завдання управління повітряним рухом, а саме різні підходи до її вирішення, одночасне вирішення кількох завдань, створює навантаження на дії осіб групи керівництва польотами [1-3].

Тому, актуальним є напрямок досліджень роботи осіб групи керівництва польотами, пов'язаний з розробкою інформаційної системи управління повітряним рухом (УПР). Вона дозволяє інтегрально оцінювати різні показники якості їх діяльності з використанням автоматизованих робочих місць.

**Аналіз літератури.** Теоретичні та методологічні питання побудови інтелектуальної системи досить повно викладені в [4-6]. Формування інформаційної системи в аналогічній системі контролю за порядком використання повітряного простору розглянуті в [7-8]. Ці та інші роботи в аналізованій предметній області базуються на припущенні, що інформаційні ознаки, що підлягають відображенню, є відомими. Однак питання безпосереднього розпізнавання варіантів ФПЛ з використанням методів інтервальної нечіткої множини другого типу (ІНМТ2) і нечіткої логічної системи інтервального типу 2 (НЛС ІТ2) в даній літературі не розглядаються [9-10]. У [11-16] розглянуті питання автоматизації процесів вироблення рішень в системах уп-

равління. У [17;18] розроблено формалізований опис знань про процес визначення напрямків головного удару засобів повітряного нападу противника, але без урахування можливих видів невизначеності цих знань.

Проблема удосконалення професійної підготовки осіб ГКрП, в тому числі з використанням інформаційної системи управління повітряним рухом для формування умінь і навичок в складній обстановці, залишається недостатньо дослідженою. Дана система дозволить аналізувати, контролювати й інтегрально оцінювати різні показники якості діяльності осіб групи керівництва польотами.

**Мета статті.** Удосконалення методу прийняття рішення з формування потоків літаків для заходу на посадку з використанням нечітких нейромережових технологій.

### Виклад основного матеріалу

При побудові нечіткої нейронної мережевої моделі процесу УПР необхідно досліджувати надійність роботи кожної особи ГКрП щодо формування потоків літаків у своїй зоні відповідальності, у т.ч. з урахуванням виникнення нештатних ситуацій у повітрі і на землі [19-21].

Щоб не ускладнювати саму нейронну мережу і не збільшувати час її навчання, зупинимось на досліджуванні надійності роботи керівника польотів у зоні візуального контролю. Саме в цій зоні акумулюється вся інформація про повітряну і наземну обстановку. Крім того, керівник польотів займає центральне місце у складі ГКрП.

Схема процесу УПР фактично являє послідовний контроль за повітряними суднами (ПС) на різних етапах польоту (рис. 1). При плануванні УПР необхідно співвідносити задане місце розташування ПС з фактичним.

Джерело: розроблено автором за даними [22; 23]. Позиція 1. У встановлену годину плановою таблицею керівник польотів дозволяє запуск двигунів, особисто управляє рухом літаків у процесі руління.

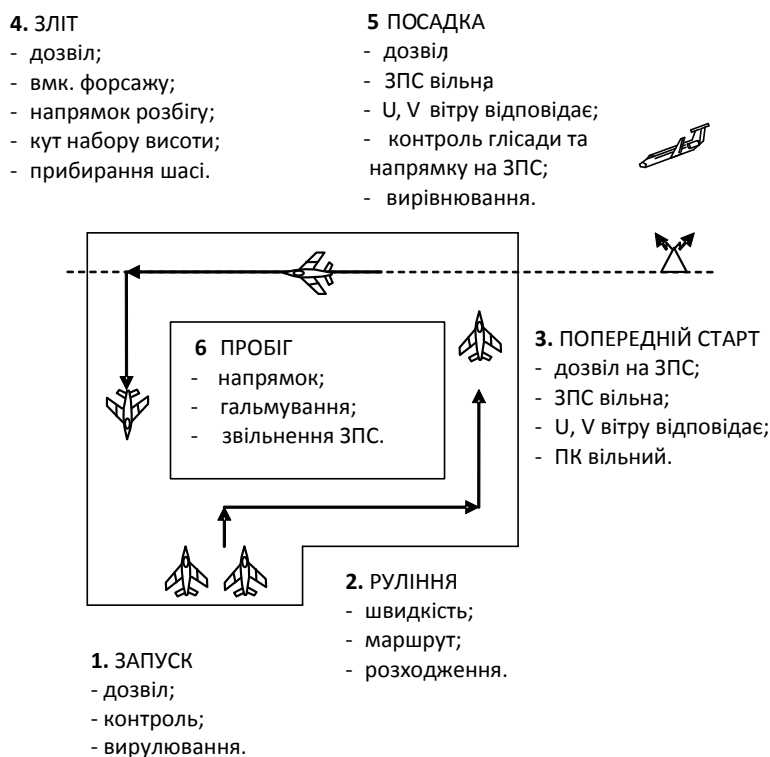


Рис. 1. Схема процесу управління повітряним рухом керівника польотів в зоні візуального контролю (джерело: розроблено автором за даними [22; 23])

Позиція 2. У процесі руління керівник польотів стежить за витримкою швидкості руху, маршруту і розходження з іншими ПС та перешкодами.

Позиція 3. Після доповіді льотчика про готовність до зльоту дозволяє (забороняє) зліт (по радіо або світлофорами) і контролює рух літака від початку розгону до виходу за межі візуальної видимості. При цьому увага звертається на витримку напрямку розгону, створення злітного кута, витримку бойового порядку в групі, кута набору висоти, прибирання шасі.

Позиція 4. При відхиленнях у процесі зльоту, а тим більш при виникненні аварійної ситуації, керівник польотів повинен уміти миттєво оцінювати ситуацію, швидко й грамотно ухвалювати рішення й діяти рішуче. При зльоті літака керівник польотів повинен безперервно стежити за ним, не відволікаючись на рішення інших питань.

Позиція 5. Після доповіді льотчика про проход радіомаяка керівник польотів переконується в тому, що ЗПС вільна, і дає дозвіл на посадку. По можливості візуально знаходить літак, по сигналізації (доповіді) від спостерігаючого за шасі переконується в їх випуску й контролює глисаду зниження, напрям заходу й виконання посадки, надаючи при необхідності льотчику допомогу.

Позиція 6. У процесі пробігу керівник польотів стежить за витримкою напрямку, випуску гальмівного парашута й процесом гальмування. Якщо парашут не вийшов (не наповнився) або обірвався, негайно попереджає про це льотчика й дає команду на більш ефективного використання гальмівної системи літака. Після закінчення пробігу контролює

звільнення злітно-посадкової смуги (ЗПС), скидання гальмівного парашута й зарулювання літака на стоянку.

Особливо складним елементом в УПР є формування потоку літаків. Це пояснюється тим, що це відбувається в зоні ЗПС, яка має обмежену пропускну здатність, що залежить від таких факторів:

- характеристик елементів льотного поля;
- метеорологічних умов;
- посадочних систем, які використовуються;
- льотно-технічних характеристик ПС;
- встановлених норм ешелонування;
- організації руху ПС у зоні зльоту і посадки.

Зазвичай кілька факторів є неявними. Тому у процесі вдосконалення моделі виділяють певний набір критеріїв, який може доповнюватися. Він не впливає на саму систему, але якісно покращує “портрет” об’єкта дослідження.

Потім складають правила нечітких продукцій виду IF-THEN взаємодії виявлених чинників. Формуються вибірки для навчання нечіткої нейронної мережі.

Далі, ґрунтуючись на знаннях експертів визначаються варіанти формування потоку літаків при використанні ЗПС, а також кількість і значимість факторів, що впливають на ФПЛ.

Найбільш складним варіантом ФПЛ за технологічною процедурою при використанні ЗПС є “посадка після зльоту”. На відміну від варіантів “зліт після зльоту” і “зліт після посадки”, коли керівник польотів може затримати ПС, яке злітає, на будь-який необхідний час, у процедурі “посадка після зльоту” керівник польотів повинен абсолютно точно розрахувати

всі часові інтервали для забезпечення безпеки польотів. При виконанні процедури “посадка після посадки” інтервал між літаками забезпечують керівник ближньої зони і керівник зони посадки.

Таким чином, визначені основні схеми ФПЛ. Кожна з них характеризується певною кількістю факторів, що впливають на ефективність як окремого процесу-блоку, так і всього УПР в цілому. Фактори, що впливають та їх значимість, визначаються, в основному, з міркувань і досвіду експертів.

Формальне представлення прогнозованих варіантів ФПЛ як сукупності нечітких продукційних правил або формування бази правил для кожного можливого варіанту ФПЛ у рамках розробленого методу здійснюється за результатами формування описів класів згідно з виразами (1, 2):

$$M^t_{noc(oj)} \geq M_{zad(o)}; \quad (1)$$

$$\left\{ \beta^{N^P}, \beta^{Q^P}, \beta^{L^P}, \beta^{H^P}, \beta^{Z^P} \right\}, \quad (2)$$

де лінгвістичні змінні (ЛЗ) мають такі найменування: “кількісний склад бойових порядків”; “напрямок заходу на посадку”; “ширина розпуску бойових порядків”; “глибина розпуску бойових порядків”; “значимість ПС, щодо першочерговості заходу” відповідно (2). При цьому використовуються правила нечітких продукцій  $R$  :

$$c_j^P = \left\langle \begin{matrix} FOU(\tilde{A}_{\Pi i}^{N^P}), FOU(\tilde{A}_{\Delta q}^{Q^P}), FOU(\tilde{A}_{\Pi l}^{L^P}), \\ FOU(\tilde{A}_{\Pi h}^{H^P}), FOU(\tilde{A}_{\Delta k}^{Z^P}) \end{matrix} \right\rangle. \quad (3)$$

З погляду математичної формалізації, нечітке продукційне правило, представлене виразом

$$c_j^P = \left\langle \alpha_i^{N^P}, \alpha_q^{Q^P}, \alpha_l^{L^P}, \alpha_h^{H^P}, \alpha_k^{Z^P} \right\rangle, \quad (4)$$

де  $\tilde{A}_{\Pi i}^{N^P}$  – ТНІ ІНМТ2, що представляє дані про кількісний склад ПС в  $j$ -му бойовому порядку й описує можливі значення відповідної НЗ  $\alpha_i^{N^P}$ ;  $\tilde{A}_{\Delta q}^{Q^P}$  – ТНЧ ІНМТ2, що представляє дані про напрям заходу на посадку  $j$ -го бойового порядку й описує можливі значення відповідної НЗ  $\alpha_q^{Q^P}$ ;  $\tilde{A}_{\Pi l}^{L^P}$  – ТНІ ІНМТ2, що представляє дані про ширину розпуску  $j$ -го бойового порядку й описує можливі значення відповідної НЗ  $\alpha_l^{L^P}$ ;  $\tilde{A}_{\Pi h}^{H^P}$  – ТНІ ІНМТ2, що представляє дані про глибину розпуску  $j$ -го бойового порядку й описує можливі значення відповідної НЗ  $\alpha_h^{H^P}$ ;  $\tilde{A}_{\Delta k}^{Z^P}$  – ТНЧ ІНМТ2, що представляє дані про значимість  $j$ -го бойового порядку й описує можливі значення відповідної нечіткої змінної (НЗ).

Дане нечітке продукційне правило (3) розглядається як нечітка імплікація вигляду [24 – 26]:

$$\tilde{A} \rightarrow \tilde{B}. \quad (5)$$

де  $\tilde{A} \subseteq X$  и  $\tilde{B} \subseteq Y$  – ІНМТ2, що представляють відповідно умову і заключення (що описують можливі значення НЗ). При цьому  $\tilde{B}$  являє собою одноточкову ІНМТ2, для якої  $\mu_{\tilde{B}}(y) = 1$  (при представленні ІНМТ2 способом вертикального срізу),  $X$  – область визначення умови (у загальному випадку  $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$  и  $\tilde{A} = \tilde{A}_1 \times \tilde{A}_2 \times \dots \times \tilde{A}_n$ ),  $Y$  – область визначення заключення (номера класів із множини  $C_p = \{c_j^P\}$ ).

Мінімальна кількість сформованих нечітких продукційних правил відповідно до (3), (4), відповідає потужності множини можливої кількості ПС, які одночасно знаходяться у повітрі  $card C_p = |C_p| = m$ , прогнозованих у плановій таблиці у ході підготовки до виконання бойового завдання. Тоді нечітке продукційне правило, що визначає приналежність варіанту ФПЛ до класу  $c_j^P$ , матиме такий вигляд у двох варіантах формального представлення:

$$\left( R_j : \text{if } \beta^{N^P} \text{ is } \alpha_i^{N^P} \text{ and } \beta^{Q^P} \text{ is } \alpha_q^{Q^P} \text{ and } \beta^{L^P} \text{ is } \alpha_l^{L^P} \right) \& \left( \beta^{H^P} \text{ is } \alpha_h^{H^P} \text{ and } \beta^{Z^P} \text{ is } \alpha_k^{Z^P} \text{ then } \beta^{NGU} = c_j^P \right); \quad (6)$$

$$R_j : \tilde{A}_{\Pi i}^{N^P} \times \tilde{A}_{\Delta q}^{Q^P} \times \tilde{A}_{\Pi l}^{L^P} \times \tilde{A}_{\Pi h}^{H^P} \times \tilde{A}_{\Delta k}^{Z^P}. \quad (7)$$

З метою забезпечення повноти початкової бази правил (БП) про розпізнавання варіанту ФПЛ:

– для кожного прикладу, отриманого при формуванні навчальної вибірки за результатами прогнозування варіанту ФПЛ, визначаються нечіткі ступені приналежності заданих значень ЛЗ до відповідних  $FOU$  ;

– кожному навчальному прикладу ставляться у відповідність ІНМТ2, згідно з виразами (8) – (11), нечіткі ступені приналежності, до яких у відповідних значеннях ЛЗ є максимальними.

$$T^{N^P} = \left\{ \begin{matrix} \alpha_1^{N^P} = \text{"менше } n_r^{11}, n_r^{12} \text{ ПС"}, \\ \alpha_2^{N^P} = \text{"в діапазоні } n_l^{21}, n_l^{22} - n_r^{21}, n_r^{22} \text{ ПС"}, \\ \dots, \\ \alpha_{N-1}^{N^P} = \text{"в діапазоні } n_l^{(N-1)1}, n_l^{(N-1)2} - n_r^{(N-1)1}, \\ n_r^{(N-1)2} \text{ ПС"}, \\ \alpha_N^{N^P} = \text{"більше } n_r^{N1}, n_r^{N2} \text{ ПС"}, \end{matrix} \right\} \quad (8)$$

де  $\alpha_i^{N^P}$  – НЗ, що описує можливий кількісний діапазон ПС, що заходять на посадку  $i = 1, \dots, N$ .

$$T^{Q^P} = \left\{ \begin{matrix} \alpha_1^{Q^P} = \text{"1-й напрямок"} \\ \dots \\ \alpha_M^{Q^P} = \text{"M-й напрямок"} \end{matrix} \right\}, \quad (9)$$

де  $\alpha_q^{L^P}$  – НЗ, що описує можливий діапазон напрямів заходу на посадку  $q = 1, \dots, M$ .

$$T^{L^P} = \left\{ \begin{array}{l} \alpha_1^{L^P} = \text{"менше } n_r^{11}, n_r^{12} \text{ км"}, \\ \alpha_2^{L^P} = \text{"в діапазоні } n_l^{21}, n_l^{22} - n_r^{21}, n_r^{22} \text{ км"}, \\ \dots \\ \alpha_{L-1}^{L^P} = \text{"в діапазоні } n_l^{(L-1)1}, n_l^{(L-1)2} - n_r^{(L-1)1}, \\ n_r^{(L-1)2} \text{ км"}, \\ \alpha_L^{L^P} = \text{"більше } n_r^{L1}, n_r^{L2} \text{ км"}, \end{array} \right. \quad (10)$$

де  $\alpha_l^{L^P}$  – НЗ, що описує можливий діапазон значень ширини розпуску бойових порядків ПС  $l = 1, \dots, L$ ;

$$T^{H^P} = \left\{ \begin{array}{l} \alpha_1^{H^P} = \text{"менше } n_r^{11}, n_r^{12} \text{ км"}, \\ \alpha_2^{H^P} = \text{"в діапазоні } n_l^{21}, n_l^{22} - n_r^{21}, n_r^{22} \text{ км"}, \\ \dots \\ \alpha_{H-1}^{H^P} = \text{"в діапазоні } n_l^{(H-1)1}, \\ n_l^{(H-1)2} - n_r^{(H-1)1}, n_r^{(H-1)2} \text{ км"}, \\ \alpha_L^{H^P} = \text{"більше } n_r^{H1}, n_r^{H2} \text{ км"}, \end{array} \right. \quad (11)$$

де  $\alpha_h^{L^P}$  – НЗ, що описує можливий діапазон значень глибини розпуску бойових порядків ПС  $h = 1, \dots, H$ .

Сформована так само множина правил у вигляді виразів (6), (7) є початковою БП. Дані правила формуються для кожного прогнозованого варіанту ФПЛ. Надалі вони є вхідними даними методу формалізації знань про виявлення і розпізнавання варіантів ФПЛ на основі нечітких класифікаторів.

Таким чином для забезпечення несуперечності БП полягає в тому, щоб не допустити в процесі формування нечітких продукційних правил випадків, коли одна і та ж сама комбінація термів ЛЗ приводить до визначення різних варіантів ФПЛ. Порядок виконання операцій із забезпечення несуперечності БП для розпізнавання варіантів ФПЛ аналогічний

порядку виконання операцій із забезпечення несуперечності БП для розпізнавання складних (групових) об'єктів.

## Висновки

У роботі розглянуто метод прийняття рішення з формування потоків літаків для заходу на посадку з використанням нечітких нейромережових технологій. Розроблено схему інформаційної системи процесу УПР, що описує формування потоку літаків у зоні візуального контролю в умовах невизначеності і з урахуванням впливу на процес нечітких факторів. Визначені реальні схеми ФПЛ, в кожній з яких виділяються значущі фактори, що впливають на ефективність як окремого блоку-процесу, так і управління повітряним рухом в цілому. Для визначення схем ФПЛ, кількості факторів, які впливають на процес та їх значимості у використанні знань і досвіду експертів, які здійснюють реальне керівництво польотами на аеродромах Збройних Сил України.

Отримав подальший розвиток метод формалізації знань про прогнозовані варіанти ФПЛ, в якому, на відміну від відомих, розроблений апарат формалізації побудовано на основі гібридної нечіткої нейронної мережі, що реалізує нечіткі операції над інтервальними нечіткими множинами другого типу і є ізоморфною початковій базі нечітких продукційних правил. Навчальна вибірка для визначення початкової бази правил формується за результатами використання взаємопов'язаних часткових математичних моделей прогнозування варіантів ФПЛ. Це дозволяє автоматизувати процес формування початкової бази правил шляхом співставлення кожного прикладу із вибірки відповідному керуючому правилу; врахувати невизначеність лінгвістичних та інтервально оцінюваних параметрів прогнозованих варіантів ФПЛ з використанням інтервальних нечітких множин другого типу; усунути суб'єктивність при виборі виду і параметрів функцій приналежності у нечітких висловлюваннях правил, а також забезпечити можливість автоматичного набуття знань шляхом навчання гібридної нечіткої нейронної мережі та розпаралелити обчислення з реалізацією відповідного алгоритму навчання на графічних процесорах.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мажара І.П., Тимочко О.І., Чернов В.Г. Інформаційна модель допуску осіб групи керівництва польотами до управління повітряним рухом. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2018. № 1(30). С. 24 – 29.
2. Мажара І.П., Тимочко О.І. Модель інформаційної системи управління повітряним рухом з точки зору операторської діяльності осіб групи керівництва польотами. *Системи озброєння і військова техніка*. 2021. № 1(65). С. 12–17.
3. Степанов Г.С., Камінський В.В., Павленко М.А. Погляди щодо проблемних питань застосування Повітряних Сил в протиповітряній обороні. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2018. № 1(30). С. 18 – 23.
4. Джума Л.Н., Неделько В.Н., Пилипенко О.Н., Хох В.Д. Интеллектуальная обучающая система как средство повышения эффективности процессов управления воздушным движением. *Научные записки Украинского научно-исследовательского института связи*. К.: Украинский НИИ связи, 2015. № 6(40). С. 49 – 55.
5. Павленко М.А. Методы и процедуры отбора операторов АСУ при использовании интеллектуальных систем поддержки принятия решений. *Збірник наукових праць ХУПС*. Вип. 4 (33). Х. : ХУ ПС, 2012. С. 171–177.
6. Герасимов Б.М. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений: навч. пос. / Б.М. Герасимов, В.М. Локазюк, О.Г. Оксіюк, О.В. Поморова. – К.: Вид-во Європ. ун-ту, 2007. – 335 с.
7. Павленко М.А., Бердник П.Г., Хромов И.Ю. Метод анализа деятельности оператора автоматизированных систем управления воздушным движением. *Системи обробки інформації*. Х.: ХУ ПС, 2007. Вип. 1(59). С. 78-81
8. Олизаренко С.А. Нечеткие множества типа 2. Терминология и представление / С.А. Олизаренко, Е.В. Брежнев, А.В. Шрепелица // *Системи обробки інформації*. – 2010. – № 8(89). – С. 131–140.

9. Неделько В.Н. Обеспечение эффективности информационной поддержки принятия решений в автоматизированных системах обслуживания воздушного движения с элементами искусственного интеллекта: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.13 / В.Н. Неделько. – К., 2002. – 183 с.
10. Олизаренко С.А. Интервальные нечеткие множества типа 2. Терминология, представление, операции / С.А. Олизаренко, А.В. Шрепелица, В.А. Капранов // Системи обробки інформації. – 2011. – № 2(92). – С. 39-45.
11. Ярушек В.Е. Теоретические основы автоматизации процессов выработки решений в системах управления / В.Е. Ярушек, В.П. Прохоров, А.В. Мишин, Б.Н. Судаков. – Х.: ХУПС, 2011. – 355 с.
12. Неділько С.М. Основи теорії функціональної стійкості автоматизованої системи управління повітряним рухом: монографія / С.М. Неділько. – Кіровоград: ДІАУ, 2011. – 218 с.
13. Неділько С.М. Основи теорії функціональної стійкості автоматизованої системи управління повітряним рухом: монографія / С.М. Неділько. – Кіровоград: ДІАУ, 2011. – 218 с.
14. Субботин С.А. Интеллектуальные информационные технологии проектирования автоматизированных систем диагностики и распознавания образов: монография / С.А. Субботин, А.А. Олейник, Е.А. Гофман. – Х.: Компания Смит, 2016. – 317 с.
15. Тимочко А.И. Моделирование деятельности лица, принимающего решения, в системах сетевого управления / А.И. Тимочко, М.А. Павленко, В.Н. Руденко // Радиотехника. Вып. 151. – Х.: МОНУ, ХНУРЕ, 2007. – С. 85-91.
16. Павленко М.А. Моделирование деятельности оператора с использованием CASE-технологий при разработке перспективных средств автоматизации. / М.А. Павленко // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2009. – Вип. 6(80). – С. 89-92.
17. Олизаренко С.А. Метод формализации задачи распознавания направлений ударов СВН противника на основе нечеткой классификации / С.А. Олизаренко, А.В. Перепелица, В.А. Капранов // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип. 2(100). – С. 70-80.
18. Олизаренко С.А. Метод формализации задачи определения направлений ударов СВН противника на основе автоматической нечеткой классификации / С.А. Олизаренко, А.В. Перепелица, В.А. Капранов // Системи озброєння та військова техніка. – Х.: ХУПС, 2011. – Вип. 3(27). – С. 48-55.
19. Левченко, Н.Г. Оптимизация слабо формализованных процессов с использованием нечеткой нейронной модели / Н.Г. Левченко. // Журнал университета водных коммуникаций. – СПб.: СПГУВК, Выпуск 4 (16), 2012. – С. 105–114.
20. Glushkov, S., Levchenko, N. Use of Neural Network Technologies for Improving Efficiency of Transport and Logistics Processes / N. Levchenko, S. Glushkov // Asia-Pacific Journal of Marine Science&Education, Vol. 3, # 1, 2013, pp 67–74.
21. Levchenko, N. The Imitating model of the maritime branch enterprise's information management system / N. Levchenko. // Asia-Pacific Journal of Marine Science&Education, Vol. 1, # 1, 2011, pp 107–112.
22. Управління польотами державної авіації України. Ч. 1. Правила польотів державної авіації в повітряному просторі України: навч. посіб. / О. І. Тимочко, І. П. Мажара, В. М. Сургай та ін. – Х.: ХНУПС, 2020. – 76 с.
23. Управління польотами державної авіації України, частина 2. Організація та порядок проведення польотів державної авіації України: навч. посіб./ В. Г. Чернов, І. П. Мажара, В. М. Сургай, та ін. – Х.: ХНУПС, 2018. – 76 с.
24. Mendel J.M. Type-2 fuzzy sets and systems: an overview. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2007. Vol. 2. P. 20–29.
25. Karnik N.N., Mendel J.M. Operations on type-2 fuzzy sets, *Int. J. Fuzzy Sets Syst.*, 2001. – vol. 122. – pp. 327–348.
26. Олизаренко С.А., Перепелица А.В., Капранов В.А. Нечеткие логические системы интервального типа 2. Архитектура и механизм вывода. Системи обробки інформації. Харків: ХУПС, 2011. Вип. 5 (95). С. 156 – 164.

Received (Надійшла) 23.04.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 07.07.2021

### Decision-making method for formation of aircraft flows for landing using fuzzy neural network technologies

I. Mazhara

**Abstract.** When constructing a fuzzy neural network model of the air traffic control process, it is necessary to investigate the reliability of each flight crew member in the formation of aircraft flows in their area of responsibility, taking into account the occurrence of abnormal situations in the air and on the ground. The purpose of the article: to improve the method of decision-making on the formation of aircraft flows for landing using fuzzy neural network technologies. Schemes of the air traffic control process is actually a sequential control of aircraft at different stages of flight. When planning air traffic, it is necessary to correlate the specified location of the aircraft with the actual one. Then make the rules of fuzzy products of the type IF-THEN interaction of the identified factors. Samples are formed to train a fuzzy neural network. Then, based on the knowledge of experts, the options for the formation of the flow of aircraft using the runway, as well as the number and significance of factors influencing the option of forming the flow of aircraft are determined. Thus, the basic schemes of formation of streams of planes are defined. Each of them is characterized by a number of factors that affect the efficiency of both the individual process unit and the entire air traffic as a whole. Influencing factors and their significance are determined mainly from the considerations and experience of experts. The method of formalization of knowledge about predicted formation of the flow of aircraft variants was further developed, in which, unlike the known ones, the developed formalization apparatus is built on the basis of a hybrid fuzzy neural network, which implements fuzzy operations on interval fuzzy sets of the second type and is isomorphic to the initial fuzzy production rules base. The training sample to determine the initial base of rules is formed based on the results of the use of interconnected partial mathematical models for predicting formation of the flow of aircraft variants. This allows you to automate the process of forming the initial base of rules by comparing each sample from the sample to the corresponding individual rule; take into account the uncertainty of linguistic and interval-estimated parameters of the predicted options for the formation of flows using interval fuzzy sets of the second type; eliminate subjectivity in choosing the type and parameters of membership functions in fuzzy statements of rules, and to enable the automatic acquisition of knowledge by learning a hybrid fuzzy neural network and parallelize calculations with the implementation of the appropriate algorithm for learning on graphics processors

**Keywords:** formation of aircraft flows, air traffic control, flight control groups, linguistic variable, interval fuzzy set of the second type.



В. О. Табуненко<sup>1</sup>, О. П. Марценяк<sup>2</sup>, В. І. Кужелович<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

<sup>2</sup> Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна

## УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ОРГАНІЗАЦІЇ ОБЛІКУ ДОРОЖНЬО-ТРАНСПОРТНИХ ПРИГОД У ПІДРОЗДІЛАХ, ВІЙСЬКОВИХ ЧАСТИНАХ І З'ЄДНАННЯХ НАЦІОНАЛЬНОЇ ГВАРДІЇ УКРАЇНИ

**Анотація.** Показана необхідність удосконалення системи організації обліку дорожньо-транспортних пригод, що сталися у підрозділах, військових частинах і з'єднаннях Національної гвардії України (НГУ). Проаналізовані причини скоєння дорожньо-транспортних пригод (ДТП) на дорогах країни. Збір статистичних даних про ДТП дозволить встановити основні фактори, що впливають на виникнення аварій та розробити обґрунтовані заходи по підвищенню безпеки руху, що приведе до зниження рівня аварійності на автомобільних дорогах України. Для оцінки рівня аварійності на автомобільних дорогах використовуються наступні показники: абсолютні показники; питомі показники, що являють собою відношення абсолютних показників аварійності; відносні показники. В роботі пропонується в якості кількісного показника обліку ДТП у НГУ застосувати відносний показник - загальну інтенсивність виникнення дорожньо-транспортних пригод у військовій частині (підрозділі). Запропонований показник дозволяє оцінити рівень аварійності у військовій частині (підрозділі), порівняти його між військовими частинами і вжити заходів щодо усунення причин дорожньо-транспортних пригод. Пропозиції по удосконаленню структури Книги обліку дорожньо-транспортних пригод військової частини дозволяють удосконалити облік дорожньо-транспортних пригод, визначити причини і закономірності їх виникнення.

**Ключові слова:** аварійність, дорожньо-транспортна пригода, причини дорожньо-транспортних пригод, показники аварійності, автомобільна техніка, облік і оцінка роботи машин.

### Вступ

**Постановка проблеми.** За даними Національної Поліції України, на дорогах нашої країни кожен день відбувається близько 500 дорожньо-транспортних пригод (ДТП). З початку 2021 року сталося 29545 ДТП, що на 19,5% більше, ніж у 2020 році. В них травмувалося 3696 і загинуло 415 осіб [1].

Україна є одним з лідерів у Європі за наслідками ДТП. Так, у країнах - членах ЄС на 100 тис. населення припадає 5 загиблих у ДТП, в Україні такий показник становить 12,5 осіб, що більше середньоевропейського показника на 150% [2-4]. Серед головних причин катастроф і аварій на автомобільному транспорті виділяються такі [5]:

1. Порушення правил дорожнього руху.
2. Незадовільний стан доріг та дорожньої інфраструктури.
3. Порушення режиму праці та відпочинку водіїв.
4. Нехтування правилами безпеки на автомобільному транспорті.
5. Технічна несправність машин.
6. Управління автомобільною технікою у стані алкогольного сп'яніння.

Дослідження показують - ДТП відбуваються тому, що водії, пішоходи, пасажери, велосипедисти порушують правила дорожнього руху, працівники автотранспортних підприємств порушують правила технічної експлуатації транспортних засобів, керівниками організацій здійснюється незадовільний контроль за станом доріг. В Розпорядженні Кабінету міністрів України від 30 травня 2018 р. №430-р «Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року» визначені загальні проблеми, що потребують розв'язання. Серед них:

- високий рівень смертності та травматизму в результаті дорожньо-транспортних пригод;

- недосконалість правового механізму, нормативно-правового регулювання та державного контролю у сфері безпеки на транспорті;

- недосконалість систем моніторингу дорожньо-транспортних пригод, їх статистики та управління ризиками;

- неефективний підхід до розв'язання проблеми високого рівня аварійності та тяжкості її наслідків і створення наукового підґрунтя діяльності у сфері безпеки дорожнього руху;

- відсутність конкретних вимірних цілей з підвищення рівня безпеки дорожнього руху, відповідного скоординованого плану дій у зазначеній сфері;

- незадовільний технічний стан значної кількості транспортних засобів та відсутність системи здійснення контролю за безпечністю транспортних засобів під час їх експлуатації;

- низький рівень запровадження та практичного застосування новітніх технологій і технічних засобів організації дорожнього руху, автоматизованих засобів контролю та регулювання дорожнього руху;

- недостатнє фінансування заходів, спрямованих на запобігання та зниження рівня аварійності, зменшення кількості дорожньо-транспортних пригод з тяжкими наслідками;

- неефективна система сповіщення про дорожньо-транспортні пригоди та екстреної допомоги постраждалим внаслідок дорожньо-транспортних пригод (незадовільний стан доромедичної допомоги в першу годину після дорожньо-транспортної пригоди);

- низький рівень підготовки водіїв та відсутність ефективного контролю за діяльністю автошкіл;

- низький рівень виховання суспільства у сфері безпеки дорожнього руху.

В наказі командувача Національної гвардії України від 27 грудня 2016 року № 900 визначено, що основними заходами щодо попередження ДТП є:

- додержання у військових частинах та підрозділах статутного порядку, організованості та високої відповідальності всього особового складу за закріплену техніку;

- забезпечення точного дотримання Правил дорожнього руху і правил керування транспортними засобами;

- постійне вдосконалення навичок керування машинами водійським складом;

- проведення якісного інструктування водіїв перед виконанням завдань;

- підбір старших машин з числа найбільш дисциплінованих військовослужбовців, їх систематичне навчання і ретельна підготовка до кожного перевезення;

- висока вимогливість командирів і начальників, постійний контроль за роботою водіїв на маршрутах руху;

- уживання конкретних заходів щодо кожної ДТП, ретельне розбирання її з особовим складом;

- заохочення особового складу за успіхи, досягнуті в експлуатації машин без ДТП.

Для ефективної боротьби з аварійністю на дорогах необхідно знати причини і закономірності її виникнення. Сучасним методом визначення причин скоєння ДТП, оцінки ефективності заходів по підвищенню безпеки дорожнього руху є аналіз статистичних даних про ДТП [6]. Аналіз видів ДТП, причин їх скоєння, визначення показників тяжкості наслідків від ДТП розкривають вплив дії зовнішніх факторів на виникнення ДТП. Збір статистичних даних про ДТП дозволить встановити основні фактори, що впливають на виникнення аварій та розробити обґрунтовані заходи по підвищенню безпеки руху, що приведе до зниження рівня аварійності на автомобільних дорогах України.

Існують такі показники аварійності [7]:

- 1) абсолютні показники (загальна кількість ДТП, сумарні втрати від ДТП, кількість поранених, кількість загиблих та т.і.);

- 2) питомі показники, що являють собою відношення абсолютних показників аварійності (питома доля зіткнень у загальній кількості ДТП, питома доля пішоходів у загальній кількості потерпілих);

- 3) відносні показники (кількість ДТП, що припадає на 1000 транспортних засобів, на 1 мільйон кілометрів пробігу й інші).

Абсолютні показники дають загальне уявлення про рівень аварійності, дозволяють проводити порівняльний аналіз для конкретного регіону та показують тенденцію зміни цього рівня. Набір питомих показників аварійності характеризує їх структуру і дозволяє порівнювати різні автотранспортні підприємства між собою.

Відносні показники є найбільш ефективними та дозволяють проводити порівняльний аналіз рівня аварійності різних регіонів. Але єдиного підходу до застосування показників обліку ДТП в науковій літературі не наведено. Тому розроблення показників обліку ДТП залишається актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблеми забезпечення безпечного руху автомобі-

лів досліджуються в багатьох наукових роботах. У світовій практиці виділено кілька методів оцінювання впливу організації дорожнього руху на аварійність. Серед таких методів [8]: метод підсумкового коефіцієнта аварійності; метод визначення коефіцієнта безпеки; метод аналізу конфліктності транспортних потоків; метод екстраполяції; метод аналізу транспортних зв'язків; методи багатофакторного аналізу; методи експертних оцінок. Але найпоширеніший метод дослідження безпеки дорожнього руху – це кількісний і якісний аналіз дорожньо-транспортних пригод. При цьому, у багатьох наукових працях з дослідження безпеки дорожнього руху проведено дослідження нових методів прогнозування аварійності в конкретних умовах дорожньої обстановки. Так, в роботі [9] проаналізовані методи прогнозування інтенсивності руху машин та аварійності на автомобільних магістралях: наведено переваги і недоліки існуючих методів та рекомендації щодо їх застосування в сучасних умовах. У науковій роботі [10] висвітлено ідею щодо пристосування методів математичної статистики для прогнозування аварійності за результатами щорічних зведень. У роботах [11-14] розроблено низку рекомендацій щодо поліпшення становища на автомобільних магістралях шляхом дослідження ймовірності скоєння дорожньо-транспортних пригод при взаємодії різних транспортних потоків.

Нормативно-правовими документами з питань боротьби з аварійністю на дорогах та мінімізації негативних наслідків ДТП у НГУ є: Наказ МВС від 13.06.2017 № 494 «Про затвердження Положення про службу безпеки дорожнього руху Національної гвардії України», наказ Командувача Національної гвардії України від 27 грудня 2016 року № 900 «Порядок організації та експлуатації автомобільної техніки, іншого майна номенклатури автомобільної служби Національної гвардії України». Але в перелічених роботах відсутні показники, які б могли використовуватись при аналізі ДТП у НГУ.

**Мета статті** - удосконалити систему організації обліку ДТП з автомобільною технікою у підрозділах, військових частинах і з'єднаннях НГУ шляхом введення показника оцінки відносної аварійності автомобільної техніки.

### Виклад основного матеріалу

Облік ДТП органами внутрішніх справ проводиться за місцем їх виникнення і місцем реєстрації транспортних засобів. Враховуючи, що для складання первинних матеріалів ДТП вимагається виїзд на місце пригоди співробітників уповноваженого підрозділу Національної поліції України і що реєстрація та аналіз ДТП охоплюють великий обсяг роботи, повна документація і звітність в уповноваженому підрозділі Національної поліції ведеться не по всіх ДТП, а тільки по тих, у яких є поранені і загиблі. На кожну пригоду, яка підлягає включенню в державну статистичну відомість, заповнюють картку обліку ДТП. ДТП з матеріальними втратами без жертв беруть на облік і аналізують міські, районні уповноважені підрозділи Національної поліції. Упо-

вноважені підрозділи Національної поліції при отриманні повідомлення про ДТП з участю зареєстрованих на обслуговуючій території транспортних засобів передають (письмово, по телефону) відомості про ці ДТП адміністрації підприємств і організацій – власникам транспортних засобів. Відомості про ДТП, що виникли в результаті незадовільних дорожніх умов, передаються дорожнім і комунальним організаціям. Уповноважені підрозділи Національної поліції не рідше одного разу в місяць надають можливість звіряти дані про ДТП представникам відомств, автотранспортних підприємств, дорожніх комунальних організацій за показниками, передбаченими формою звітності, і завіряють правильність цих даних.

Згідно Наказу МВС від 13.06.2017 № 494, посадові особи служби безпеки дорожнього руху (СБДР) Національної гвардії України ведуть облік ДТП в електронному вигляді. Відомості про ДТП та про роботу СБДР за звітний квартал подаються до СБДР Головного управління Національної гвардії України щокварталу до 15 числа місяця, що настає за звітним кварталом.

Кожна ДТП враховується у військових частинах (підрозділах), навчальних військових частинах (центрах), вищих військових навчальних закладах, базах, закладах охорони здоров'я та установах НГУ в книзі обліку ДТП. Облік дорожньо-транспортних пригод ведеться з метою оцінки стану аварійності, аналізу причин ДТП і вжиття заходів до їх усунення.

У зв'язку з різним ступенем тяжкості наслідків дорожньо-транспортних пригод для можливості їх порівняння і кількісного аналізу застосовують різні показники.

У НГУ застосовують абсолютні показники, але найбільш поширеними і об'єктивним вважаються відносні показники, які враховують пробіг машин.

Пропонується в якості кількісного показника обліку ДТП у НГУ застосувати відносний показник - загальна інтенсивність виникнення ДТП у військовій частині (підрозділі) за звітний період  $\vartheta_{\Sigma}(t)$ :

$$\vartheta_{\Sigma}(t) = \frac{k_1 \cdot \vartheta_1(t) + k_2 \cdot \vartheta_2(t) + k_3 \cdot \vartheta_3(t)}{3}, \quad (1)$$

де  $\vartheta_1(t)$  - інтенсивність виникнення ДТП у військовій частині (підрозділі) з загиблими за звітний період, 1/тис.км;  $\vartheta_2(t)$  - інтенсивність виникнення ДТП у військовій частині (підрозділі) з постраждалими за звітний період, 1/тис.км;  $\vartheta_3(t)$  - інтенсивність виникнення ДТП у військовій частині (підрозділі) без загиблих та постраждалих за звітний період, 1/тис.км;  $K_{T1}$ ,  $K_{T2}$ ,  $K_{T3}$  - коефіцієнти, що враховують тяжкість наслідків ДТП (відповідно: з загиблими, з постраждалими, без загиблих та постраждалих).

Показник тяжкості ДТП  $K_T$  коливається від 1/5 до 1/40. Тяжкість наслідків від ДТП може бути охарактеризована залежностями (2 - 4):

$$K_{T1} = \frac{\sum n_{ДТП1}}{\sum n_{ДТП}}, \quad K_{T2} = \frac{\sum n_{ДТП2}}{\sum n_{ДТП}}, \quad K_{T3} = \frac{\sum n_{ДТП3}}{\sum n_{ДТП}},$$

де  $n_{ДТП1}$  - кількість ДТП у військовій частині за звітний період з загиблими;  $n_{ДТП2}$  - кількість ДТП у військовій частині за звітний період з постраждалими;  $n_{ДТП3}$  - кількість ДТП у військовій частині за звітний період без загиблих та постраждалих;  $n_{ДТП}$  - загальна кількість ДТП у військовій частині за звітний період. Інтенсивність виникнення ДТП у військовій частині (підрозділі) за звітний період  $\vartheta_i(t)$  є такою:

$$\vartheta_i(t) = n_i(t) / (\alpha_j \cdot L_{\Sigma}), \quad (2)$$

де  $n_i(t)$  - кількість ДТП певного виду за період часу  $t$ ;  $\alpha_j$  - коефіцієнт важкості умов використання машин за призначенням (0,8 - легкі умови використання машин; 1 - нормальні умови використання машин; 1,25 - важкі умови використання машин);  $L_{\Sigma}$  - загальний пробіг машин військової частини (підрозділу) між ДТП (до першої ДТП), тис. км.

### Приклад розрахунку

Визначити загальну інтенсивність виникнення ДТП у військовій частині (підрозділі)  $\vartheta_{\Sigma}(t)$ , якщо кількість ДТП без загиблих та постраждалих за період часу  $t$  - 1(одна); коефіцієнт, що враховує тяжкість наслідків ДТП  $k_3 = 0,75$ ; коефіцієнт важкості умов використання машин за призначенням  $\alpha_j = 1,25$ ; загальний пробіг машин військової частини (підрозділу) між ДТП (до першої ДТП)  $L_{\Sigma} = 125000$  км. За допомогою формул (1,2), визначимо:

$$\vartheta_3(t) = \frac{1}{1,25 \cdot 125000} = \frac{1}{156250} = 6,4 \cdot 10^{-6} 1/км;$$

$$\vartheta_{\Sigma}(t) = \frac{0 + 0 + 6,4 \cdot 10^{-6}}{3} = 2,1 \cdot 10^{-6} 1/км.$$

Результати розрахунку пропонується вносити в доповнену Книгу обліку дорожньо-транспортних пригод військової частини. Пропозиція по доповненню Книги обліку дорожньо-транспортних пригод військової частини наведена на рис. 1.

Таким чином, за допомогою залежностей (1-5) можна визначити загальну інтенсивність виникнення ДТП у військовій частині, що дозволяє проводити порівняльний аналіз рівня аварійності в різних військових частинах.

### Висновки

1. Пропонується в якості кількісного показника обліку ДТП у НГУ застосувати відносний показник - загальна інтенсивність виникнення ДТП у військовій частині (підрозділі). Запропонований показник дозволяє оцінити рівень аварійності у військовій частині (підрозділі), порівняти його між військовими частинами і вжити заходів що до усунення причин ДТП.

2. Пропозиції по удосконаленню структури Книги обліку дорожньо-транспортних пригод військової частини дозволяють удосконалити облік дорожньо-транспортних пригод, визначити причини і закономірності їх виникнення.

Вказівки щодо ведення книги						
1. Книга ведеться в Головному управлінні НГУ, з'єднанні та військовій частині.						
2. Записи вкнизі здійснюються на підставі донесень про дорожньо-транспортні пригоди і матеріалів службового розслідування.						
№ з/п	Період спостереження	Кількість ДТП	Загальний пробіг машин	Коефіцієнт важкості умов використання машин за призначенням	Коефіцієнт, що враховує тяжкість наслідків ДТП	Інтенсивність виникнення ДТП
1	Жовтень – грудень 2020	1	125000 км	1,25	0,75	$\mathcal{I}_{\Sigma}(t) = 2,1 \cdot 10^{-6}$ 1/км

Рис. 1. Книга обліку дорожньо-транспортних пригод військової частини.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. <http://patrol.police.gov.ua> Патрульна поліція. Статистика ДТП в Україні за період з 01.01 по 31.01.2021: ДТП 01-2021.
2. Всемирный доклад о предупреждении дорожно-транспортного травматизма: резюме/ редакция Margie Peden [et al.]. Всемирная организация здравоохранения. 2006 г. - 54с.
3. Резолюция ООН 58/289 „Поліпшення глобальної безпеки дорожнього руху” // Матеріали Генеральної Ассамблеї ООН в документах і резолюціях (1995-2005 гг.). – М.: Международные отношения. – С. 248 – 261.
4. World's first road death. London, Roadpeace. – Интернет ресурс. – <http://www.roadpeace.org/articles.WorldFirstDeath.html>
5. Потапенко Л. Ю. Аналіз роботи автомобільного транспорту і стану дорожнього господарства як складової частини єдиної транспортної системи України // Продуктивні сили і регіональна економіка. – Київ., 2006. Ч.1. - С.258–264.
6. Гоженко А.І. Проблеми виникнення дорожньо-транспортних пригод та дорожньо-транспортного травматизму в Україні. Можливі шляхи їх вирішення./ А.І. Гоженко, Ю.С. Біла // Актуальні проблеми транспортної медицини. - № 3 (29), 2012. - С.12–22.
7. Автомобільний транспорт України: стан, проблеми, перспективи розвитку: монографія / за заг. ред. А.М. Редзюка / Державний автотранспортний науково-дослідний і проектний інститут. – Київ: ДП «Державтотранс НДІ проект», 2005. – 400 с.
8. Лобашов О.О., Прасоленко О.В. Практикум з дисципліни "Організація дорожнього руху". – Харків: Вид-во ХНАМГ, 2011. – 221 с.
9. Григоров М.А. Аналіз методів прогнозування інтенсивностей дорожнього руху / М.А. Григоров // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: Зб. наук. праць. – Горлівка : Вид-во АДІ ДонНТУ, 2007. – № 2(5). – С. 73–76.
10. Паснак І.В. Аналіз та удосконалення методів прогнозування аварійності транспортних засобів / І.В. Паснак, О.В. Придатко, Н.В. Шаркевич // Науковий вісник НЛТУ України: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: РВВ НЛТУ України. 2014. – Вип. 24.7. – С. 211–215.
11. Четверухін Б.М. Визначення режимів роботи систем координованого управління світлофорними об'єктами на підходах до зон заспокоєного руху / Б.М. Четверухін, В.Ф. Душник // Вісник ХНАДУ: Зб. наук. праць. – Харків: Вид-во ХНАДУ, 2003. – Вип. 20. – С. 72–75.
12. Душник В.Ф. До питання організації дорожнього руху на вулично-дорожній мережі / В.Ф. Душник // Безпека дорожнього руху України : наук.-техн. вісник. – Київ: Вид-во НДЦ БР МВС України, № 1-2. 2003. – С. 39–41.
13. Сараєв О.В. Аналіз сучасних показників дорожньо-транспортних пригод / О.В. Сараєв// Безопасность дорожного движения. Вісник ХНАДУ, Вип. 63, 2013.- С.101-106.
14. Бондар Т.В. Аналіз причин виникнення аварійності – шлях до обґрунтованого планування заходів з підвищення безпеки руху/ Т.В. Бондар// Автошляховик України, науково-виробничий журнал № 4 (216), 2010. –С. 45–46.

Received (Надійшла) 11.05.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.07.2021

### Improvement of the system of organization of registration of road accidents in divisions, military units and formations of the national guard of ukraine

Volodymyr Tabunenکو, Oleksandr Martsenyak, Viktor Kuzhelovych

**Abstract.** The article shows the need to improve the system of registration of road accidents that occurred in units, military units and formations of the National Guard of Ukraine. The causes of road accidents on the country's roads are analyzed. Collection of statistical data on road accidents will allow to establish the main factors influencing the occurrence of accidents and to develop reasonable measures to improve traffic safety, which will reduce the level of accidents on the roads of Ukraine. The following indicators are used to assess the level of accidents on highways: absolute indicators; specific indicators, which are the ratio of absolute accident rates; relative indicators. The paper proposes to use a relative indicator - the overall intensity of road accidents in the military unit (unit) as a quantitative indicator of road accidents in the National Guard of Ukraine. The proposed indicator allows to estimate the level of accidents in the military unit (unit), to compare it between military units and to take measures to eliminate the causes of road accidents. Proposals to improve the structure of the Book of traffic accidents of the military unit allow to improve the accounting of road accidents, to determine the causes and patterns of their occurrence.

**Keywords:** accident, road accident, causes of road accidents, accident rates, automotive equipment, accounting and evaluation of machines.

Г. В. Шапіро<sup>1</sup>, О. О. Аросланкін<sup>2</sup>, Є. Є. Постніков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна

<sup>2</sup> Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна

<sup>3</sup> Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

## ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ НАДВОДНОЇ ОБСТАНОВКИ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ СУДНОВОДІННЯ

**Анотація.** В статті доведено, що одним з перспективних напрямків підвищення ефективності вирішення названих завдань є впровадження інтелектуальних інформаційних технологій в процеси інформаційного забезпечення прийняття рішень судноводієм. Основою інформаційного забезпечення – є побудова інформаційних моделей надводної обстановки, що здатні підвищити оперативність та правильність прийняття рішень судноводієм за рахунок збільшення обсягів та різномірності інформації, яка обробляється. Незважаючи на значне оснащення сучасних суден технічними засобами навігації та управління рухом, слабким місцем залишається “людський” фактор. Передача функцій судноводія штучному інтелекту у складі сучасних автоматизованих систем не доцільна, оскільки галузь штучного інтелекту тільки розвивається, а інтелект досвідченої людини здатен на сьогоднішній день вирішувати більш складні завдання. Штучний інтелект доцільно використовувати в якості систем підтримки прийняття рішення. Доцільним є формування інформаційної моделі автоматизованої системи управління судноводінням у вигляді доповненої реальності та занурювати судноводія у таку доповнену реальність. Побудова нових інформаційних моделей з елементами доповненої реальності підвищить ситуаційну обізнаність судноводія у надводній обстановці, оперативність прийняття рішення та повноту врахування факторів.

**Ключові слова:** безпеки плавання, інформаційні моделі, навігація, судноводіння, управління рухом.

### Вступ

Безпека плавання залишається одним з пріоритетів автоматизації процесів судноводіння. Не зважаючи на значні досягнення в галузі штучного інтелекту, побудови автоматизованих систем, супутникової навігації, проблема забезпечення безпеки на морі залишається актуальною.

Ускладнення надводної обстановки, підвищення інтенсивності морських перевезень в межах глобального економічної співпраці призводить до виникнення аварійних ситуацій, яскравим прикладом якої стало сідання на міліну 24.03.2021 року судна-контейнеровоза, довжиною 400 м, яке заблокувало Суецький канал [1]. Дана ситуація вимагає необхідності вдосконалення традиційних та пошуку нових методів підвищення ефективності вирішення завдань судноводіння [2, 3]. Одним з перспективних напрямків підвищення ефективності вирішення названих завдань є впровадження інтелектуальних інформаційних технологій в процеси інформаційного забезпечення прийняття рішень судноводієм. Основою інформаційного забезпечення – є побудова інформаційних моделей надводної обстановки, що здатні підвищити оперативність та правильність прийняття рішень судноводієм за рахунок збільшення обсягів та різномірності інформації, яка обробляється.

В результаті повинні бути отримані узагальнені та систематизовані дані про надводну обстановку, представлені в зручній формі для судноводія.

Найбільш трудомісткими завданнями узагальнення та систематизації відомостей про надводну обстановку є завдання спільної обробки поточних даних, що надходять від різномірних інформаційних джерел, та знань екіпажа судна, якими вони володіють априорі. Дане завдання може бути вирішено шляхом занурення судноводія до інтерфейсу доповненої реальності з роз-

робкою відповідних інформаційних моделей. Отже, формування ефективних інформаційних моделей надводної обстановки, які здатні підвищити оперативність та правильність прийняття рішення судноводієм, є актуальним науковим завданням.

**Метою статті** є дослідження факторів, які впливають на формування інформаційної моделі надводної обстановки та формування інтелектуальної моделі обстановки для її подальшого застосування при автоматизації процесів судноводіння.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Звертаючись до відомих джерел за темою дослідження, необхідно їх умовно розділити на декілька взаємопов'язаних груп.

До першої групи джерел віднесемо публікації з безпеки судноводіння таких вітчизняних та закордонних фахівців як Л.Л. Вагушенко [4], А.С. Мальцева [5], В.В. Астреїна [6], які використані з метою аналізу предметної області безпеки судноводіння та місце автоматизованих систем в ній. До другої групи джерел віднесемо нормативні документи з безпеки судноводіння, які відпрацьовані міжнародними організаціями [7, 8], які використані для формування вимог щодо побудови інформаційних моделей автоматизованих систем судноводіння в частині безпеки. До третьої групи джерел віднесемо роботи з проектування інформаційного забезпечення та побудови моделей штучного інтелекту таких відомих дослідників як С. Рассел [9], В.К. Фін [10], К.С. Амелін [11], які використані для обґрунтування побудови інтелектуальних моделей інтерфейсу.

Четверта група джерел складається з публікацій вітчизняних вчених, присвячених проблемі автоматизації безпеки судноводіння [12 - 14].

Використання даних літературних джерел, їх аналіз дозволив зробити висновок, що основною

тенденцією сучасності є побудова інформаційних моделей, які орієнтуються на 3D моделюванні, виникає протиріччя протиріччя між традиційно сформованим типом взаємодії “людина”-“машина” при побудові інформаційних моделей та можливостями сучасних інформаційних технологій, що вже у 2021 році вже дозволяють перейти до взаємодії “людина”- “операційне середовище” при формуванні інформаційних моделей надводної обстановки.

### Основна частина

Ергатична система судноводіння представляє собою цілеспрямовану складну систему, у складі судноводія, знаряддя діяльності, предмета діяльності та внутрішнього середовища [2, 13, 14]. На теперішній час у судноводінні застосовується концепція побудови e-navigation [15] для гармонізованого збору, інтеграції, обміну, представлення та аналізу інформації щодо надводної обстановки на борті судна й у берегових службах за допомогою електронних засобів для удосконалення процесу переходу судна від причалу до причалу та відповідних сервісів, що забезпечують безпеку, охорону судів, берегової інфраструктури і захист навколишнього середовища. E-navigation повинна сприяти інтеграції та удосконаленню судових навігаційних систем, включаючи береговий сегмент та системи зв'язку п'ятого покоління. Суднові системи, що включають сенсори, стандартний інтерфейс та систему управління охоронними зонами та оповіщення, планується об'єднується в єдиний інтегрований комплекс. Проблема “людського фактору” та забезпечення прийняття судноводієм інформації є наріжним каменем даної концепції.

Судноводій отримує інформацію про надводну обстановку через інтерфейс користувача, який представляє собою комплекс програм, який реалізують діалог користувача з інформаційною системою на всіх стадіях її функціонування. Інтерфейс користувача є ключовим компонентом у питанні забезпечення безпеки мореплавання, оскільки саме він інтегрує інформацію від різнорідних джерел та забезпечує діалог людини та машини в традиційному варіанті інтерфейсу, а новий інтерфейсом (інтерес середовища або доповненої реальності). У зв'язку з тим, що технологія доповненої реальності вважається однією зі складових систем комп'ютерного зору, можна стверджувати, що даний формат інтерфейсу містить елементи штучного інтелекту.

Основний обсяг інформації людина отримує за допомогою зору. Завдання інформаційної моделі надводної обстановки полягає в тому, щоб забезпечити тривимірне представлення візуального середовища, що може служити відправною точкою для процесів розпізнавання й класифікації, насамперед інформації про форму об'єктів та просторовий розподіл. Це 3D представлення – об'єктна-орієнтоване, а не орієнтоване на систему відліку оператора. Інформаційний підхід у психології сприйняття розглядає судноводія як складну комп'ютероподібну систему переробки вхідної сенсорної інформації. Цей процес розглядається у вигляді послідовних або паралельних етапів, кожний з яких виконує специфічні

операції з перетворення інформації. Кінцева мета інформаційного підходу в сприйнятті – створення структурно-функціональної моделі, що складає з окремих блоків, що виконують функцію, подібну до побудови перцептивного образу психікою судноводія.

Аналіз зорових образів, які формуються зоровою системою судноводія ієрархічний. Прийємо будь-який образ, за допомогою якого здійснюється дія на зорову систему судноводія (наприклад, формуляр надводного об'єкту) у вигляді розподілу  $J(x)$  у багатомірному просторі ознак  $\{x\}$ . Пробна дія може бути розподілена за декількома характеристиками. Елементи формуляру  $J(x)$  можуть бути описані такими ознаками, як кутовий або лінійний розмір, орієнтація, віддаленість, протяжність, швидкість переміщення. в процесі сприйняття зображення  $J(x)$  судноводієм сформується в зоровому центрі кори головного мозку візуальний образ  $R(x)$ .

Будемо вважати  $R(x)$  – моделлю відображення. Спираючись на модель зорової системи людини-оператора у відповідності з парадигмою Д. Марра [16], оцінемо диференціал перетворення через частковий перетворення:

$$\begin{aligned} F\{J\{x\}, R\{x\}\} &= \sum_{i=1}^N \left( \frac{R\{x_i\}}{J\{x_i\}} \right) \left( \frac{J\{x_i\}}{x_i} \right) \Delta x_i = \\ &= \sum_{i=1}^N S_{x_i} J / \{x_i\} \Delta x_i, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $S_{x_i} = R\{x_i\} / J\{x_i\}$  та визначає диференціальну чутливість зорової системи до зміни пробної дії  $x_i$ , яку на відміну від функціоналу рефлексії можна оцінити експериментальним шляхом.

Кількість сприйнятої інформації судноводієм обмежено пропускною здатністю ока, що залежить від інформаційної ємності зображення та часу реакції людини. Інформаційна ємність зображення визначається співвідношенням кількості елементів інформаційного поля та помітною яскравістю, що має деяке число градацій.

На якість роботи системи впливають шумові властивості каналів передачі, прийому та перетворення інформації. Власні шуми системи визначають мінімальний граничний рівень вхідного сигналу, що може бути сприйнятий системою. У цьому зв'язку для забезпечення повноти опису системи  $\{\phi_i\}$  до неї доцільно включати абсолютні граничні чутливості  $S_{a_i}$ , які визначаються шумовими характеристиками сенсорної системи.

Розрізняють три рівні зорового сприйняття: сенсорний; перцептивний; операторний. На сенсорному рівні сприйняття відбувається виявлення об'єкта і виділення його з навколишнього середовища. Процеси виявлення і виділення визначаються закономірностями законів сприйняття. Перцептивний рівень сприйняття характеризується законами топо-

логічної організації об'єктів, а операторний рівень містить у собі оцінку значення сприйманих об'єктів, установлення відношень між ними.

Дослідження в статті спрямоване на інформаційні моделі судноводія в середовищі, де компонента реального фізичного оточення взаємодіє з компонентами штучного оточення. При цьому судноводій отримує можливість обробляти більшу кількість навігаційних даних з мінімальною імовірністю помилки, що є винятково важливим при цифровізації та автоматизації його діяльності.

Технологія доповненої реальності (augmented reality, AR) - технологія, яка дозволяє інтегрувати інформацію з об'єктами реального світу у формі тексту, комп'ютерної графіки, аудіо та інших представлень у режимі реального часу. Інформація надається користувачу з використанням heads-up display (індикатор на лобовому склі), окулярів або шоломів доповненої реальності (HMD) (іншої форми проектування графіки для людини (наприклад, планшет)). Технологія доповненої реальності дозволяє розширити взаємодію судноводія з навколишнім середовищем.

Технологія віртуальної реальності (virtual reality, VR) - це комплексна технологія, що дозволяє занурити людину в іммерсивний віртуальний світ при використанні спеціалізованих пристроїв (шоломів віртуальної реальності). Віртуальна реальність забезпечує повне занурення в комп'ютерне середовище, що оточує користувача та реагує на його дії природним чином. Віртуальна реальність конструює новий штучний світ, переданий людині через його відчуття: зір, слух, дотик та інші.

Людина може взаємодіяти з тривимірним, комп'ютеризованим середовищем, а також маніпулювати об'єктами або виконувати конкретні задачі.

У своїй найпростішій формі віртуальна реальність включає 360-градусні зображення або відео. Досягнення ефекту повного занурення у віртуальну реальність до рівня, коли користувач не може відрізнити візуалізацію від реальної обстановки, є задачею розвитку технології. Технології віртуальної і доповненої реальності являють собою складні технологічні розробки, які складаються із субтехнологій. Реалії XXI століття змушують не тільки судноводів, але і всіх споживачів цифрових послуг перейти в нову реальність (середовище), що передбачає розширене використання цифрових технологій.

Система доповненої реальності містить у собі різні технології та сенсори, такі, як апаратні компоненти для урахування обставин реального середовища та програмні компоненти для об'єднання реальних й віртуальних даних. Результатом є новий погляд на реальне середовище, доповнений даними, отриманими технічним шляхом. Взаємодія судноводія з інформаційним середовищем повинне забезпечуватися точними вимірами положення в просторі, для того, щоб віртуальні об'єкти мали високий ступінь правдоподібності. Така можливість з'являється з розвитком систем зв'язку 5G. Для оцінки положення й орієнтації, візуалізації доступних даних і можливостей взаємодії система доповненої реальності повинна об'єднати різні технології.

На рис. 1 представлено архітектуру системи доповненої реальності для формування інформаційної моделі надводної обстановки.

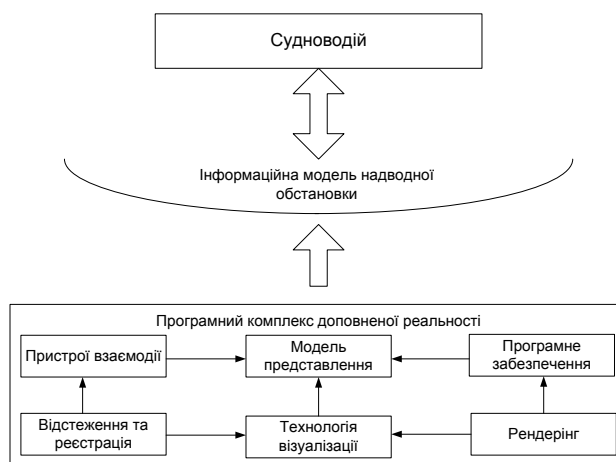


Рис. 1. Архітектура системи доповненої реальності для формування інформаційної моделі надводної обстановки

Основою ефективної системи доповненої реальності є розрахунок місця розташування спостерігача та його характеристик [9]. Багатофункціональні сенсори можуть бути об'єднані для досягнення найкращого результату в реальному масштабі. У роботах початку XXI століття, пов'язаних із проблематикою інтелектуальної складової морської ергатичної системи судноводія, питанню інтерфейсу приділяється значна увага [3, 5, 6, 12]. Проте питання залишається відкритим, оскільки технологічні рішення дотепер не знайшли практичного застосування в більшому ступені у зв'язку з відсутністю методологічних основ, що повинні ґрунтуватися на концептуальних принципах й стандартах. В основному багато авторів зосереджені на передачі визначеної кількості функцій судноводія штучному інтелекту за рахунок більшої надійності, точності і швидкості останнього.

При цьому слід зазначити той факт, що штучний інтелект ще знаходиться в стадії створення, а людський інтелект, володіючи меншими енерговитратами та великим об'ємом пам'яті й продуктивністю не задіюється повністю. Таким чином, доцільно занурити існуючий людський інтелект у доповнену реальність та розширити його можливість. У зв'язку з розвитком систем гібридного інтерфейсу (змішана реальність) та пов'язаної з ними теорії іммерсивних індукованих середовищ здобуває значення підхід кооперативної автоматизації, що реалізує ідеологію адаптивної автоматизації, яка полягає в динамічному розподілі функцій між людиною й автоматичною частиною системи. Мета даного підходу – створення гібридного середовища, у якій людина і машина працюють спільно, доповнюючи один одного. Для побудови поточних алгоритмів оперативного керування морською ергатичною системою найбільше істотним є локальний опис стану об'єкта в цілому та взаємодії його з навколишнім середовищем. Однак через нестационарність його доцільно записати рівнянням стану об'єкта та навколишнього середовища у формі загального рівняння переходу

$$X[k+1] = \Phi(X, U, F, t)X[k] + W(t)U[k] + G(t)F[k], \quad (2)$$

де  $\Phi(X, U, F, t)$  – функція переходу, що враховує зміни стану;  $U[k]$  – вектор управляючих дій;  $F[k]$  – вектор збуджуючих дій;  $W(t)U[k]$  та  $G(t)F[k]$  – векторні інтегральні перетворення управляючих та збуджуючих дій.

Доцільно ввести вектор вимірних змінних стану об'єкту та середовища:

$$Y[k] = CX[k] + v[k], \quad (3)$$

де  $v[k]$  – вектор похибок виміру;  $C$  – матриця зв'язку вимірних змінних зі змінними стану.

Опишемо складові інформаційної моделі надводної обстановки при застосуванні архітектури доповненої реальності (рис. 2).



Рис. 2. Зміна складових інформаційної моделі при переході до доповненої реальності

**Відображення інформації.** У традиційному варіанті взаємодії “людина”-“машина” інформацію, яку використовував судноводій, можна було розділити на оперативну та апіорну. Відповідно до кон-

цепції взаємодії “людина”-“середовище” пропонується ввести ще один тип інформації – інформація в режимі реального часу. По суті інформація середовища завжди була доступна оператору, але раніше вона не містила віртуальних компонентів, тому що засобом їхнього відображення була ЕОМ (дисплеї систем автоматизованої радіолокаційної прокладки, електронна картографічна навігаційна система).

**Форма представлення інформації.** У роботах з ергономіки проглядається ідея переходу до більш прогресивних та ємних форм. В якості такої форми пропонуються візуальні образи у форматі 3D. Основною перевагою такого представлення інформації є її інтеграція в єдиний образ, здатний швидко та цілісно сприйматися людиною-оператором (судноводієм). Форма та колір візуального образу дозволяють судноводієві стежити за змінами відповідного параметра (курс, швидкість, глибина та ін.) і легко виявляти відхилення від норми.

**Значимість інформації.** Значимість інформації визначається в залежності від її змістовного навантаження, відносної важливості і корисності при рішенні конкретної навігаційної задачі. Даний інформаційний спектр визначається районом плавання, особливостями власного судна, умовами видимості та ін. При цьому слід зазначити, що віртуальна інформація, у новому форматі взаємодії стає інформацією режиму реального часу. Її значимість переважає стає значимою відносно будь-якої іншої раніше. На рис. 3 представимо приклад побудови такої інформаційної моделі [17].

При розгляді ергатичних систем питання інформаційних моделей користувача виходить на перший план.

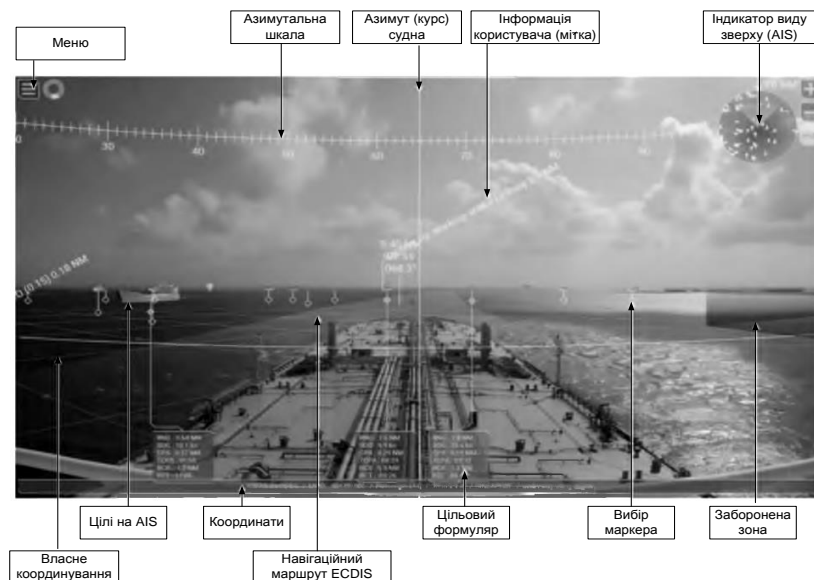


Рис. 3. Інформаційна модель надводної обстановки з елементами доповненої реальності (приклад)

## Висновки

За результатами проведених досліджень з'ясовано:

- стрімкий розвиток інформаційних технологій безпосередньо впливає на удосконалення автомати-

зованих систем судноводіння, спрямованих на забезпечення безпеки плавання;

- незважаючи на значне оснащення сучасних суден технічними засобами навігації та управління рухом, слабким місцем залишається “людський” фактор;



- передача функцій судноводія штучному інтелекту у складі сучасних автоматизованих систем не доцільна, оскільки галузь штучного інтелекту тільки розвивається, а інтелект досвідченої людини здатен на сьогоднішній день вирішувати більш складні завдання. Штучний інтелект доцільно використовувати в якості систем підтримки прийняття рішення;

- доцільним є формування інформаційної моделі автоматизованої системи управління судноводінням у вигляді доповненої реальності та занурю-

вати судноводія у таку доповнену реальність;

- побудова нових інформаційних моделей з елементами доповненої реальності підвищить ситуаційну обізнаність судноводія у надводній обстановці, оперативність прийняття рішення та повноту врахування факторів.

Напрямами подальших досліджень слід вважати застосування технології нечітких нейронних мереж для розпізнавання ситуацій в надводній обстановці при автоматизації процесів судноводіння

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Контейнеровоз заблокував Суецький канал. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.epravda.com.ua/rus/news/2021/03/29/672385/> (Дата звернення: 31.05.21).
2. Astrein V. Determination of ships passing strategy by the use of a conflict function / V. Astrein // Eurasian Union of Scientists. – 2015. – № 12(21). – С. 1-3.
3. Шерстюк В.Г. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений по управлению судном в условиях неполной и противоречивой информации / В.Г. Шерстюк, А.П. Бень // Судовождение. – 2007. – № 14. – С. 141-144.
4. Вагущенко Л.Л. Поддержка решений по расхождению с судами / Л.Л. Вагущенко, А.Л. Вагущенко. – Одесса : Феникс, 2010. – 229 с.
5. Мальцев А.С. Интеллектуальные гибридные системы поддержки принятия решений при расхождении судов / А.С. Мальцев // Судовождение : сб. научн. трудов ОНМА. Вып. 11. – Одесса : ИздатИнформ, 2006. – С. 74-86.
6. Астреин В.В. Основы интеллектуальных систем предупреждения столкновений судов: монография / В.В. Астреин. – Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2014. – 109 с.
7. Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 (МППСС-72) [Электронный ресурс]. – М.: РКонсульт, 2004. – 80 с. – Режим доступу: <http://www.mppss.ru/rules/> (Дата звернення: 31.05.21).
8. SOLAS: Consolidated text of the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, and its Protocol of 1988: articles, annexes and certificates: IMO: 2004 edition [Электронный ресурс]. – London.: IMO publication, 2005. – P. 565. – Режим доступу: [http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\)-1974.aspx](http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS)-1974.aspx). (Дата звернення: 31.05.21).
9. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. Москва : Вильямс, 2006. 1408 с.
10. Фин В.К. Об интеллектуальном анализе данных // Новости Искусственного интеллекта, 2004. - № 3 - С. 98-103.
11. Амелин К.С., Баклановский М.В., Граничин О.Н. и др. Адаптивная мультиагентная операционная система реального времени // Стохастическая оптимизация в информатике, 2013. - Т. 9. Вып. 1. - С. 3-16.
12. Дакі О.А., Дорошева А.О., Іваненко В.М., Чебан В.І. Агентоорієнтована модель реалізації системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння. Системи озброєння і військова техніка. 2020. № 3(63). С. 122-30. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.63.18>.
13. Вильский Г. Б. Информационная безопасность судовождения : монография. – Николаїв : Видавництво ФОП Швець В.Д., 2014. – 336 с.
14. Мельник О.В., Шапран Ю.Є., Матюхов А.Т., Бойко О.А. Дослідження системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння / Водний транспорт: Збірник наукових праць. Випуск 1(32). 2021.
15. Hagen J.E. Implementing e -Navigation, 2017. - 203 p.
16. Marr, D. Theory of edge detection / D. Marr, E. Hildreth // Proceedings of the royal society of London. Vol. 207, No. 1167, 1980. - P. 187 -217 .
17. Попов, А.Н., Кондратьев, А.И., Субанов, Э.Э., Субанов, Р.Э. Интеллектуализация интерфейса пользователя концепции e-Navigation в формате Head-Up // Эксплуатация морского транспорта. - 2019. - № 2 (91). - С. 50-59.

Received (Надійшла) 21.04.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.08.2021

**Formation of information model of above-water surface for automation of shipping processes**

Hanna Shapiro, Oleksandr Aroslinkin, Yevgen Postnikov

**Annotation.** The article proves that one of the promising directions for increasing the efficiency of solving the above problems is the introduction of intelligent information technologies into the information support processes for decision-making by the navigator. The basis of information support is the construction of information models of the surface situation, which can increase the efficiency and correctness of decision-making by the navigator by increasing the volume and heterogeneity of information processed. Despite the significant equipment of modern ships with technical means of navigation and traffic control, the "human" factor remains a weak point. The transfer of the navigator's functions to artificial intelligence as part of modern automated systems is impractical, since the artificial intelligence industry is just developing, and the intelligence of an experienced person is capable of solving more complex problems today. It is advisable to use artificial intelligence as decision support systems. It is expedient to form an information model of an automated navigation control system in the form of augmented reality and to immerse the navigator in such augmented reality. The construction of new information models with elements of augmented reality will increase the situational awareness of the navigator in the surface environment, the efficiency of decision-making and the completeness of factor accounting.

**Keywords:** navigation safety, information models, navigation, navigation, traffic control

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВІБРОГАСИТЕЛЯ

**Анотація.** Одним із основних напрямів технічного прогресу в машинобудуванні являється ріст продуктивності і точності механічної обробки деталей, покращення якості поверхонь, що обробляються, котрі пов'язані з удосконаленням вібраційної стійкості обладнання. Вібрації обмежують підвищення режимів різання при оброблюванні деталей, погіршують шорсткість поверхонь, створюють наклеп верхніх шарів, при цьому суттєво знижують точність обробки і стійкість ріжучого інструменту. Виникнення коливань обумовлено зміною режимів різання, зовнішніми силами і зміною параметрів пружної системи верстат-приспособування-інструмент-деталь (ВПД). Із великої кількості машинобудівного обладнання найбільш поширеними являються верстати для оброблювання тіл обертання, токарної і кругло-шліфувальної групи (більш ніж 40%). Тому значне підвищення точності і продуктивності токарної обробки нежорстких деталей типу тіл обертання являється актуальним напрямом в машинобудівній галузі, а розроблення способів захисту від вібрацій відноситься до основних найбільш важких науково-технічних задач. В даний час відомі різноманітні методи і способи зниження вібрацій. До них можна віднести: балансування і зрівноваження машин, зміна жорсткісних, демпфуючих і інерційних параметрів обладнання. Для перелічених способів характерна для кожного раціональна область застосування. Віброгасителі мають особливе призначення, так як вони можуть бути використані не тільки при проектуванні і створенні конструкції, а і при експлуатації для покращення незадовільних динамічних якостей обладнання, котрі виявлені при впровадженні в виробництво. Перевага віброгасителів також полягає в тому, що при значно малих затратах на їх створення і експлуатацію вони дають можливість отримати бажаний ефект зниження рівня вібрацій. При роботі віброгасителя формує силові дії, котрі передаються на об'єкт. Зміна вібраційного стану об'єкта при приєднанні динамічного гасителя здійснюється як шляхом перерозподілу коливальної енергії від гасителя до об'єкта, так і при допомозі розсіювання коливань. Перший спосіб здійснюється налагодженням пружно-інерційних властивостей системи об'єкт-гаситель на резонансну частоту. Другий спосіб оснований на підвищенні дисипативних властивостей системи шляхом приєднання до об'єкта додаткових спеціальних демпфуючих елементів. В такому випадку говорять про динамічний гаситель з тертям. В основу динамічних гасителів положено використання пасивних елементів (мас, пружин, демпферів) і активних, котрі мають власні джерела енергії. Для зниження вібрацій, що виникають при обробці тіл обертання, нами було спроектовано і досліджено віброгаситель.

**Ключові слова:** математична модель, віброгаситель, власні, вимушені коливання, механічна система, динамічні навантаження, податливість, коливальні явища.

### Вступ

Зниження вібрацій є одним із перспективних напрямів, котрі зв'язані з проблемами міцності, ресурсу і безпеки [1-3]. Виникаючи, в процесі виконання технологічних операцій, вібраційні навантаження погіршують роботу системи, знижують надійність і тривалість експлуатації. При експлуатації верстатів під дією сил різання можуть деформуватися його пружні ланки, в результаті чого змінюються умови різання, тертя. Виникнення коливальних явищ при роботі верстатів від'ємно виявляється на точності обробки, знижує технологічні можливості обладнання, а також зменшує його довговічність. В зв'язку з цим, підвищення показників динамічної якості верстатів, в тому числі їх вібростійкості, являється актуальною задачею.

**Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.** Створення нових типів машин, а також удосконалення існуючих постійно вимагають уточнення методів їх розрахунку, що також пов'язано із необхідністю вивчення питань динаміки віброгасителів. Відомі три категорії віброгасителів. До них відносяться: віброгасителі ударного типу; тертя; динамічні.

Автори Гаврилін А.Н., Ангаткіна О.О., Рожков П.С., Сікора Е.А. [4] розробили віброгаситель

в'язкого тертя, який може використовуватися в машинобудуванні при металообробці для гашення коливань при токарній і шліфувальній операціях деталей типу тіл обертання. Запропонована авторами конструкція віброгасителя поглинає енергію коливань за рахунок в'язкого тертя в автоматично налагодженому діапазоні. Недоліком запропонованого віброгасителя є вузька сфера використання – тільки для тіл обертання, в тому числі, низький діапазон робочих частот і неможливість переналадки частот гашення вібрацій. Також віброгаситель має складну будову.

Автором Болдіним Л.А. [5] запропонована конструкція віброгасителя ударної дії, який може бути використаний для зниження рівня вібрації на більш високих частотах. Під час роботи віброгаситель розсіює енергію коливань за рахунок удару маси віброгасителя по основній масі, що коливається. Недоліком запропонованого віброгасителя являється відсутність можливості переналадки частоти коливань, що гасяться. Групою авторів під керівництвом Гавриліна А.Н. [6] розроблений динамічний самонастроюваний гаситель коливань. Гаситель може бути використаний в машинобудуванні для захисту від вібрації різних об'єктів. До недоліків можна віднести відсутність можливості оперативної зміни частоти віброгашення.

**Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми.** Існують технологічні і конструктивні методи підвищення вібростійкості верстатів. Технологічні методи реалізуються шляхом оптимального розташування зон різання, оптимізації режимів різання. Конструктивні методи реалізуються наступним чином:

- створенням більш жорстких конструкцій;
- підвищенням точності верстатів;
- балансування обертаючих систем;
- використанням різних гасителів, робота яких основана на розсіюванні енергії коливань.

Більшість із конструктивних методів реалізується тільки на стадіях створення обладнання і його монтажу. Балансування і використання гасителів найбільш підходить для змонтованого верстата.

Найбільш універсальним являється метод віброгашення вібрацій металорізальних верстатів з використанням гасителів коливань, так як він не вимагає втручання в систему верстата і при можливості може віброгаситель підстроюватися під різні типи верстатів. Проте, при підборі і використанні поглиначів можуть виникати уже нові проблеми, зв'язані з їх конструктивними і технологічними особливостями. На сьогоднішній момент не існує найбільш універсального, що широко використовується, віброгасячого пристрою, який би підходив до більшості груп верстатів, і тим більше до всіх.

Дана робота і направлена на вирішення, з використанням застосунку MathCAD, питань створення і дослідження віброгасителя, котрий відповідав би вище переліченим вимогам.

**Постановка завдання.** Метою цієї роботи є створення адекватної фізичному процесу математичної моделі віброгасителя.

### Виклад основного матеріалу

Для теоретичних досліджень віброгасителя нами розроблена розрахункова схема гашення коливань, яка зображена на рис. 1. На розрахунковій схемі (рис. 1) демпфуючий об'єкт, під яким приймається деталь, що обробляється, представлений зосередженою масою  $m_1$ .

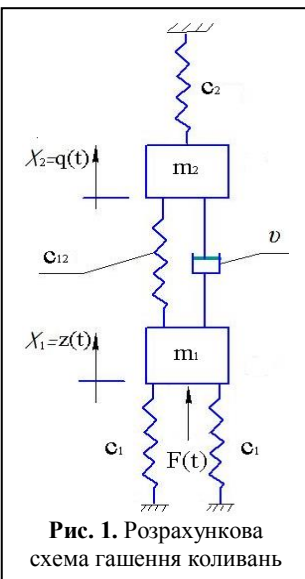


Рис. 1. Розрахункова схема гашення коливань

закріпленій в передній і задній бабках, що мають жорсткості  $c_{н.б.}$  і  $c_{з.б.}$ . При обробці на деталь діє збурююча сила різання  $F(t)$ , котра передається на

супорт, що має жорсткість  $c_c$ . Для гашення коливань до деталі, що обробляється приєднується віброгаситель, що моделюється масою рухомих елементів віброгасителя  $m_2$  і масою плунжера, що взаємодіє з поверхнею деталі і включає стиснуті пружини з жорсткістю  $c_{12}$ . Віброгаситель має власну жорсткість конструкції  $c_2$ .

В розробленій нами математичній моделі (рис. 1) під характеристиками об'єкта, тобто, жорсткістю  $c_1$  приймаються приведені жорсткості системи ВПД [1]:

$$c_1 = \frac{(c_{н.б.} + c_{з.б.})c_c}{c_{н.б.} + c_{з.б.} + c_c} + c_d + c_{пр.}, \quad (1)$$

де  $c_1, c_d, c_c, c_{н.б.}, c_{з.б.}, c_{пр.}$  – жорсткості демпфуючого об'єкта, деталі, що обробляється, супорта, передньої і задньої бабок, пружин, Н/м.

Рівняння руху запишемо в такому вигляді:

$$m_1 \ddot{X}_1 + C_1 X_1 + C_{12}(X_1 - X_2) + v \dot{X}_1 = F(t); \quad (2)$$

$$m_2 \ddot{X}_2 + C_2 X_2 + C_{12}(X_2 - X_1) + v \dot{X}_2 = 0, \quad (3)$$

де  $F(t) = P_z$ ;  $P_z$  – сила різання, Н;  $\omega$  – колова частота вимушених коливань об'єкта,  $c^{-1}$ ;  $v$  – коефіцієнт, що характеризує загасання;  $X_1, X_2, \dot{X}_1, \dot{X}_2$  – переміщення і швидкості мас  $m_1$  і  $m_2$ ;  $t$  – час.

Початкові умови представимо у вигляді ( $t = 0$ )

$$X_{10} = 0, X_{20} = 0, \dot{X}_{10} = 0, \dot{X}_{20} = 0, F_0 = 0. \quad (4)$$

Для зручності рішення на ЕОМ системи рівнянь з використанням застосунку MathCAD приводимо її до такого вигляду:

$$m_1 z''(t) + C_1 z(t) + C_{12} [z(t) - q(t)] + v z'(t) = F(t);$$

$$m_2 q''(t) + C_2 q(t) + C_{12} [q(t) - z(t)] + v q'(t) = 0.$$

$$z'(t) = v(t);$$

$$v'(t) = -\frac{C_1 + C_{12}}{m_1} z(t) + \frac{C_{12}}{m_1} q(t) - \frac{v}{m_1} z'(t) + \frac{1}{m_1} F(t);$$

$$q'(t) = d(t); \quad (5)$$

$$d'(t) = -\frac{C_2}{m_2} q(t) - \frac{C_{12}}{m_2} q(t) + \frac{C_{12}}{m_2} z(t) - \frac{v}{m_2} q'(t);$$

$$k(t) = -\frac{C_1 + C_{12}}{m_1} z(t) + \frac{C_{12}}{m_1} q(t) - \frac{v}{m_1} z'(t) + \frac{1}{m_1} F(t);$$

$$n(t) = -\frac{C_2}{m_2} q(t) - \frac{C_{12}}{m_2} q(t) + \frac{C_{12}}{m_2} z(t) - \frac{v}{m_2} q'(t),$$

де  $k(t), n(t)$  прискорення зосереджених мас  $m_1$  і  $m_2$ . Після підстановки даних із табл. 1 отримаємо

$$v'(t) = 0,57F(t) - 151393z(t) - 22164z'(t) + 22164q(t) - 8v(t);$$

$$\begin{aligned}
 \dot{z}(t) &= v(t); \quad \dot{q}(t) = d(t); \\
 \dot{d}(t) &= 21914z(t) - 8d(t) - \\
 &\quad -26299q(t) - 21914q(t); \\
 k(t) &= 0,57F(t) - 151393z(t) - 22164\dot{z}(t) + \\
 &\quad + 22164q(t) - 8v(t); \\
 n(t) &= 21914z(t) - 8d(t) - 26299q(t) - 21914q(t); \\
 \text{Початкові умови мають вигляд } (t=0): \\
 z(0) &= 0, \quad q(0) = 0, \quad v(0) = 0, \quad d(0) = 0, \\
 F(0) &= 0, \quad k(0) = 0, \quad n(0) = 0.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Розв'язання системи рівнянь (5) робимо для віброгасителя, що має параметри, які наведені в табл. 1. Для визначення прискорень в системі диференціальних рівнянь (5) записані два рівняння прискорень  $K(t)$  маси  $Z(t) = K(t)$ , та  $N(t)$  маси  $Q(t) = N(t)$ .

Таблиця 1 – Параметри віброгасителя

Параметри	Одиниці вимірювання	Числові значення
$m_1$	кг	1,754
$m_2$	кг	1,774
$P_z$	Н	3998
$\omega$	$C^{-1}$	209
$\nu$	–	14
$C_1$	Н/м	265543
$C_{12}$	Н/м	38876
$C_2$	Н/м	46654

В результаті розв'язання системи рівнянь (5) отримуємо значення переміщень, швидкостей, а також прискорень демпфуючого об'єкта  $m_1$  та рухомих частини віброгасителя  $m_2$ .

Під час теоретичних досліджень змінювалось співвідношення жорсткостей  $C_2 / C_1$ . Далі приводимо найбільш характерні результати обчислень, які підтверджують зниження амплітуди демпфуючого об'єкта ( $m_1$ ).

На рис. 2 приведено обчислені значення амплітуди маси  $m_1$ , яка представляє демпфуючий об'єкт при співвідношенні  $C_2 / C_1 = 0,01$ , а на рисунку 3 – при співвідношенні  $C_2 / C_1 = 0,005$ . Порівняння значень амплітуди маси  $m_1$  на рис. 2 і 3 показує зниження її в два рази при співвідношенні  $C_2 / C_1 = 0,005$ , яке являється найбільш оптимальним. На рис. 4, 5 приведені значення деяких основних параметрів отриманих при дослідженнях.

Порівнюючи побудовані графіки, як з урахуванням загасання  $\nu$  так і без нього, можна зробити висновок, що значення відрізняються несуттєво і визначені параметри мають більш точні значення при урахуванні загасання  $\nu$ .

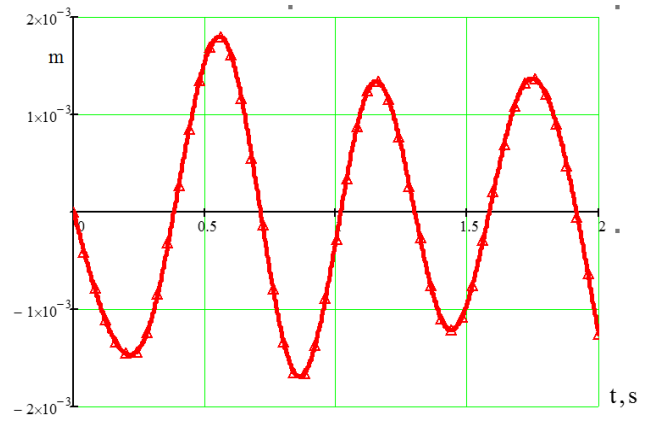


Рис. 2. Зміна переміщення  $Z(t) = X_1$  маси  $m_1$  (амплітуди демпфуючого об'єкта) віброгасителя), Співвідношення жорсткостей  $C_2 / C_1 = 0,01$

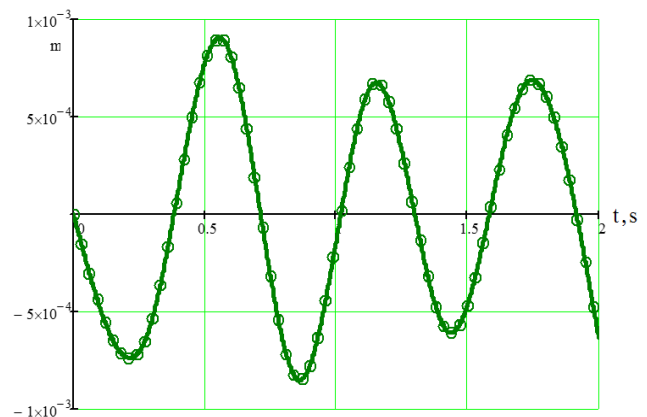


Рис. 3. Зміна переміщення  $Z(t) = X_1$  маси  $m_1$  (амплітуди демпфуючого об'єкта) віброгасителя), Співвідношення жорсткостей  $C_2 / C_1 = 0,005$

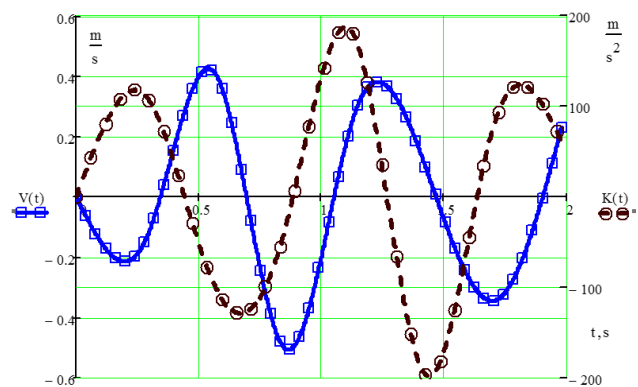


Рис. 4. Зміна швидкості  $V(t) = Z'(t)$  та прискорення  $K(t) = Z''(t)$  маси  $m_1$  віброгасителя

Для перехідних процесів, показаних на рис. 2, 3, 4 і 5, характерне коливання переміщень, швидкості і прискорень пружних ланок віброгасителя.

Використання числових методів інтегрування диференціальних рівнянь дозволяє використовувати запропоновану методику для розрахунку динамічних навантажень у механічних системах гашення коливань з використанням віброгасителів.

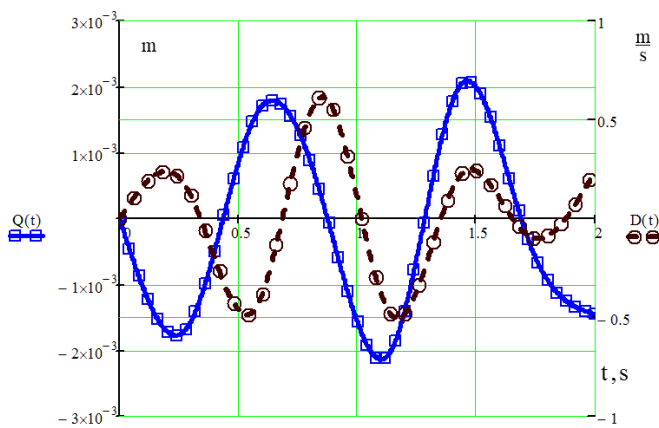


Рис. 5. Зміна переміщення  $Q(t) = X_2$  маси  $m_2$  та її швидкості  $D(t) = \dot{Q}(t) = \dot{X}_2$  віброгасителя

### Висновки

1. В роботі на основі аналізу тенденцій розвитку технологічного обладнання призначеного для підвищення вібраційної стійкості верстатів для обробки деталей типу тіл обертання та існуючих технічних рішень віброгасителів, а також з використанням математичного застосунку MathCAD, досліджено

вібраційну систему в основу якої полягає зміна інерційних і жорсткісних властивостей віброзахисної конструкції.

2. В роботі визначені переміщення, швидкості та прискорення ланок віброзахисної системи з віброгасителем, а також теоретично досліджено, з використанням математичного програмного середовища MathCAD, їх динаміку.

3. Застосування числових методів інтегрування диференціальних рівнянь руху дозволяє використовувати запропоновану методику для розрахунку динамічних навантажень у подібних віброзахисних системах.

4. Результати дослідження віброгасителя, з використанням математичного програмного середовища MathCAD, можуть бути використані при проектуванні, розрахунку, визначенні основних параметрів та динамічних навантажень в ланках подібних віброзахисних систем.

Використання розробленого та дослідженого віброгасителя зі зміною інерційних і жорсткісних властивостей системи дає змогу знизити амплітуду коливань об'єкта у 2 рази, розширити робочу частотну область і підвищити продуктивність обробки.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вибрации в технике. Справочник в 6 т. / под. ред. В.Н. Челомея и К.В. Фролова. М.: Машиностроение, 1981. Т. 1. 455 с.
2. Gavrilin A. N., Moyzer B.V., Zharkevich O.M. Design and technological methods to reduce vibration activity of elements in technological systems of Vibroengineering Article in Press.
3. Gavrilin A. N., Moyzer B.V., Cerkasov A.I. // Applied Mechanics and Materials: Scientific Journal. – 2015.– Vol. 756: Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2014). – [ P. 35 - 40].
4. Пат. РФ 2475660, МПК F16, F 9/30, F 15/27.Виброгаситель вязкого трения / А.Н. Гаврилин, О.О. Ангаткина, П.С. Рожков, Е.А. Сикора. – Опубл. 20. 02. 2013. – Бюл. № 5. – 6 с.
5. Болдин Л. А. Металлорежущие станки (вопросы эксплуатации) – М.: Машгиз, 1957.– 260 с.
6. Пат. РФ 98792 МПК F16, F 6/04.Динамический самонастраивающийся гаситель колебаний / А.Н. Гаврилин, А.В. Витко, П.Я. Краузиньш, П.С.Рожков. – Опубл. 27.10. 2010. Бюл. № 30. – 2 с.

Received (Надійшла) 12.07.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

### Mathematical model of the absorber

V. Lyutenko, V. Mastyukh

**Abstract.** One of the main areas of technological progress in mechanical engineering is to increase the productivity and accuracy of machining parts, to reduce the quality of the surfaces being machined, and to improve the wear resistance of the equipment. Vibrations interfere with the increase of the cutting mode during machining of parts, impair the surface finish, create a sticking effect on the upper spheres, while significantly reducing the machining accuracy and the rigidity of the cutting tool. Occurrence of wobbles is caused by changes in cutting modes, external forces and changes in parameters of the Lathe-attachment-tool-component (LATC) system. Out of a great number of machine-building equipment the most widespread are workbenches for machining of bodies of wrapping, turning and circular grinding group (more than 40%). Therefore, a significant increase in accuracy and productivity of turning of non-rigid parts of the wrap-around bodies type is an urgent issue in the machine-building industry, and the development of methods of protection against vibrations is one of the most important scientific and technological tasks. At the present time there are various methods and ways of reducing vibrations. They can include: balancing and alignment of machines, change of rigidity, damping and inertia parameters of the equipment. Each of these methods is characterized by a rational area of application. Vibration absorbers have a special purpose, as they can be used not only in the design and construction of the structure, but also in the operation of the equipment to improve non-adverse dynamic properties of the equipment that are seen in the implementation of the production. The advantage of vibration absorbers also lies in the fact that at significantly low cost of their creation and operation they can obtain the desired effect of reducing the level of vibrations. During operation, the damper forms a force force that is transmitted to the object. Change of the vibrational state of the object when the dynamical damper is connected is performed both by re-transmission of the volatile energy from the damper to the object, and by means of spreading of the volatilities. The first method is carried out by applying the load-inertial properties of the system object-absorber to the resonant frequency. Another method is based on increasing of the system's dissipative properties by adding additional special damping elements to the object. In such a case we speak about dynamical damper with friction. Dynamical dampers are based on the use of passive elements (masses, springs, dampers) and active ones that have their own energy sources. To reduce vibrations, which occur during processing of bodies of rotation, we have designed and tested a vibration damper.

**Keywords:** mathematical model, damper, intrinsic, forced oscillations, mechanical system, dynamical loads, suppleness, oscillatory phenomena.

H. Makogon, Yu. Babkin, K. Bakanov, V. Moskalenko, M. Mosiychuk, S. Piskun

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

## PROPOSALS FOR IMPROVEMENT OF LOGISTIC SUPPORT OF STATE DEFENSE FORCES UNIT THROUGH A VISUAL GRAPHIC REPRESENTATION OF THE SITUATION AND THE APPLICATION OF THE OPERATION RESEARCH MATHEMATICAL MODELS

**Abstract.** The subject matter of the article is the logistical support of the state defense forces unit in the performance of its assigned tasks. The goal of the study is to develop of mathematical models for the complex analysis of the basic forces and means of logistical support and to increase efficiency of planning of military unit equipment with means of logistical support depending on change of a tactical situation. The tasks to be solved are: to formulate the logistics optimizing problem for the professional activity of the state defense forces unit, which includes the main units and technical support ones, in terms of operations research; to substantiate the possibility of qualifying the material support of the state defense forces unit and the formation of a transport costs matrix using ABC analysis; to identify technical solutions regarding ways to visualize information for a make-decision person on logistical support and formulation of output information for the users in the required format. General scientific and special methods of scientific knowledge are used. The following results are obtained: On the basis of use of modern principles of stocks management the optimizing task of the management of logistical support for the State defense forces wheeled and tracked vehicles unit can be formulated as an integer problem of linear programming of transport type. according to certain features of the flow nature of logistics support in the competence of the deputy commander of the Deputy Commander of the SDF armaments unit for the input information is sufficient to hold the ABC-analysis and on its basis to form a matrix of transport costs. visualization of information in graphical mode will enable to implement interactive display of material and technical support equipment deployment areas, locations of collection point of damaged vehicles, maneuvering routes, evacuation of damaged vehicles, etc. **Conclusions.** The task of finding the optimal logistics support plan for a State defense forces wheeled and tracked vehicles unit can also be classified as transport and solved by the well-known line programming methods. According to certain features of the flow nature of the drug in the competence of the deputy commander of the State defense forces unit for input information is sufficient to conduct an ABC-analysis and on its basis to form a matrix of transport costs. Visualization of information in the graphical mode will allow to realize interactive display of areas of location of material and technical support equipment units, places of assembly point of the damaged cars, ways of maneuver, delivery and evacuation of the damaged samples of weapons, etc.

**Keywords:** logistics support, wheeled and tracked vehicles, material and technical support equipment, integer problem of linear programming of transport type

### Introduction

#### **Formulation of the problem and research tasks.**

In the conditions of transformation of managerial orientation in the direction to Euro-Atlantic integration, the application of the operation research mathematical apparatus acquires a new meaning.

The concept of material flow management, the essence of which lies in the integration of all functional spheres associated with the passage of the material flow from producer to consumer into a single complex, is called "logistic" and has found its functional application in the military sphere.

The development of new mathematical models to provide a comprehensive analysis of the main logistical support (LS) forces and improve the effectiveness of planning for the equipment of a military unit with material and technical support equipment (MTE) depending on changes in the tactical environment seems relevant in this regard.

**Analysis of recent research and publications** on the above issues shows the relevance of the study.

In [1] it was formalized a space-geometric configuration of the logistic support system for military training based on the analysis of signs (links)

between elements of the system and objects of the military order.

The system is supported and a class of mathematical methods (models) for determining the location of the elements of the system on the area is defined.

The issue of determining the approach to the positioning of evacuation (repair and evacuation) units in the operational zone (area) of responsibility for the minimum total distance to the elements of the combat order is considered in [2, 3].

**The goal** of the study is to develop of mathematical models for the complex analysis of the basic forces and means of logistical support and to increase efficiency of planning of military unit equipment with means of logistical support depending on change of a tactical situation.

To achieve this goal the following **research tasks** are solved:

- to formulate the logistics optimizing problem for the professional activity of the state defense forces (SDF) unit, which includes the main units and technical support ones, in terms of operations research;
- to substantiate the possibility of qualifying the material support of the state defense forces division and

the formation of a transport costs matrix using ABC analysis;

- to identify technical solutions regarding ways to visualize information for a make-decision person on logistical support and formulation of output information for the users in the required format.

### Main material

#### 1. Formulation of the problem of optimizing logistic support for the operational activities of the state defense forces, which includes the main units and technical support units, in the terms of operations research.

Logistics is a rather new notion for us: the bibliography has not yet defined it as a separate scientific field in the Ukrainian enterprises that are only now beginning to pay it some attention, and the Ukrainian literary sources devoted to this problem are represented in small numbers.

Nevertheless, the applied warehouse of logistic research is widely reflected in stock management methods in various industries. The most efficient solution of logistic problems is achieved by using a powerful mathematical apparatus of operations research.

As we know, the functioning of the units of the state defense forces (SDF) must be provided with certain resources: stocks of material and technical equipment (MTE), availability of repair bodies, maintenance personnel, etc. [4, 5].

Optimization of resource allocation is often carried out according to the specified criteria and certain limitations. These tasks can be included in the class of transport tasks of linear programming.

Suppose that in the SDF area of responsibility there are  $n$  units of wheeled and tracked vehicles (WTV), each  $j$ -th of which requires the provision of MTE resources in an amount not exceeding  $b_j$ ,  $j = 1, \dots, n$ .

The operation of the main units is provided by  $m$  types of logistics units, each of which has a resource reserve  $a_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ .

The cost of supplying an MTE unit from  $i$  to  $j$  point is  $c_{ij}$ .

The matrix  $C_{ij} = (c_{ij})$ ,  $i=1, \dots, m$ ,  $j=1, \dots, n$  is sometimes called the transport cost matrix. Its values are determined by the activity orientation of the enterprise.

When forming the matrix  $C_{ij}$  can be taken into account not only the material cost of transportation of a certain number of units of MTE resource and time, risks or priority of displacement. The task is to create a resource allocation plan that meets the needs and does not exceed the available capacity.

Denote by  $x_{ij}$ ,  $i=1, \dots, m$ ,  $j=1, \dots, n$  – the movement of a number of resource units from the  $i$ -th support unit to the  $j$ -th main unit.

Then the total cost will be as follows:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}.$$

The optimal transportation plan  $X^*$  will be called a plan that provides a minimum amount of costs for the transportation of all resources.

It should be noted that the semantic load of coefficients  $c_{ij}$ ,  $i=1, \dots, m$ ,  $j=1, \dots, n$  can vary depending on the specifics and conditions of the tasks performed by the WTV unit. Thus, it is possible to minimize time, fuel costs, risk, maximize efficiency, etc.

Thus, of the problem of optimizing logistic support for the operational activities of the state defense forces units on the basis of using modern principles of inventory management can be formulated as an integer problem of linear programming of transport type:

Find a set

$$X^* = \{x_{ij}^*\}, i=1, \dots, m, j=1, \dots, n,$$

such that minimizes the objective function

$$F(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (1)$$

and satisfies the conditions

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0, x_{ij} \in Z, \quad (4)$$

$$i=1, \dots, m, \quad (5)$$

$$j=1, \dots, n, \quad (6)$$

We should note that expression (2) refers to the provision of the WTV units with the full amount of MTE equipment.

Similarly, view (3) means the condition of full use of resources.

Taking into account the actual conditions of LS, expressions (2) and (3) can be written as

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq b_j, \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i, \quad (8)$$

Under the condition

$$\sum_{i=1}^m a_i \neq \sum_{j=1}^n b_j$$

problem (1)-(8) is called open, but can be reduced to closed by piecemeal methods.

In the authors' opinion, it is promising to use the results of ABC analysis to form the coefficients  $c_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$ , namely, to take into account the hierarchy of LS of the main units and relevant logistics support ones.

Proceeding from this, as a focus of further research can be requested a more sophisticated formulation of the transport problem, namely the introduction of limits of the form.

$$\sum_{i=1}^m r_{ij} x_{ij} \leq b_i \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^n r_{ij} x_{ij} \leq a_i \quad (10)$$

$$i=1, \dots, m, \quad (11)$$

$$j=1, \dots, n, \quad (12)$$

The task of finding the optimal LS plan for a state defense forces wheeled and tracked vehicles unit can also be classified as transport and solved by the well-known line programming methods [6].

## 2. Possibility to qualify the material support of the SDF unit and to form a matrix of transport costs by means of ABC analysis.

The authors consider the possibility to qualify the material support of the state defense forces division by means of ABC analysis, a method that allows to classify resources depending on their significance. The classification is based on the Pareto principle.

Regarding ABC analysis, the Pareto principle is the following: reliable control of 20% of positions allows 80% control of the system.

In business, the ABC-analysis principle and the Pareto principle are most often used in logistics for inventory management: regarding stocks of hardware, components, suppliers, customers, etc.

For example, ranking stocks by value, we can define:

category "A" (they say 10% of stocks, the value of which is 70% of total production),

category "B" (20% of stocks, which account for 20% of total production);

category "C" (the value of which is 100%).

Thus, logistics managers should focus on the management of category "A" stocks.

With respect to "B" stocks, the control can be periodic, with "C" stocks being more generous [7, 8].

By analogy the authors propose to conduct ABC-analysis and on its basis form transport costs matrix  $C_{ij} = (c_{ij})$ ,  $i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$  for determined risks of flow nature of LS of state defense forces unit.

Thus, as input information in the competence of the Deputy Commander of the state defense forces armaments unit, it is proposed to consider:

– availability, condition of armor and military equipment (MTE);

– foreseen costs and losses, the need for and the possibility of their comprehensive maintenance (MTE) and repair (R);

– training and staffing of specialists, mechanics - drivers and drivers for other units;

– possibility of using local industrial and economic base (resources).

Using mathematical apparatus of factor analysis is proposed to make the obtained data processing to form their ABC - hierarchy.

Forming such a matrix manually is a very important process, so there are systems for its automation [9, 10].

## 3. Defining technical solutions for ways of visualization of information for the make-decisions person on logistics and the formation of source information for users in the desired format.

The main idea of LS improvement is to process the input and output information in an interactive mode, operational and optimal management of material flows. In this regard, the authors consider it appropriate to visualize the information for the PL decision maker and generate the output information for the users in the required format.

The "overlay" of the resulting solution on the information of the mapping services and technologies is proposed using Cash- and MIP-mapping procedures.

This will enable use of cached copies of map sheets at different scaling levels and visualize the solution at the cost of efficient use of information resources.

Cached copies of mapsheets of different scales can be stored in a virtual storage and used by control signals if there is an order to visualize the information of the mapping service.

In this process, the image quality of map sheets with different levels of detail is improved by using textures with different separation capacities for different objects of the same image, depending on their size and depth.

Thus, visualization of information in graphical mode will enable to implement interactive display of MTE deployment areas, locations of collection point of damaged vehicles, maneuvering routes, evacuation of damaged vehicles, etc.

The prerequisite for technical implementation of modernization of LS is the use of new information technologies, such as onboard information systems of the "Command and Control" class (e.g., Hermes-C2), which can be installed directly on armored vehicles [11, 12].

An airborne information system integrated with Aselsan and Harris communications equipment can also be effective for LS tasks.

## Conclusions

1. The task of finding the optimal logistics support plan for a State defense forces wheeled and tracked vehicles unit can also be classified as



transport and solved by the well-known line programming methods.

2. According to certain features of the flow nature of the drug in the competence of the deputy commander of the state defense forces unit for input information is sufficient to conduct an ABC-analysis and on its basis to form a matrix of transport costs.

3. Visualization of information in the graphical mode will allow to realize interactive display of areas of location of material and technical support equipment units, places of assembly point of the damaged cars, ways of maneuver, delivery and evacuation of the damaged samples of weapons, etc.

## REFERENCES

- Gulyaev, A.V. (2010), "The choice of criteria for assessing the technological efficiency of recovery methods of armored weapons and military equipment", *Systemy ozbroynennya i viyskova tekhnika*, vol. 4, no. 24, pp. 36-39.
- Chorny, M.V. and Dolgov, R.V. (2014), "Positioning of evacuation (repair-evacuation) bodies of military formation on the ground", *Systemy ozbroynennya i viyskova tekhnika*, vol. 1, no. 37, pp.88-92.
- Sytnyk, V.F. (2004), *Decision Support Systems*, Tutorial tool, KNEU, Kyiv, UA, 614 p.
- Rolin, I.F., Morozov, I.Ye. and Myn'ko, O.V. (2017), "The content of the main terms in the field of logistics of military formations", *Systemy ozbroynennya i viyskova tekhnika*, no 1(49), pp. 61-64.
- Khazanovych, O.I., Ishutin, I.S. and Ivchenko, V.V. (2010), *Tekhnichne zabezpechennya viys'k (syl): navch. posib.* [Technical support of troops (forces): a textbook], NUOU im. Ivana Chernyakhovs'koho, Kyiv, UA.
- Ventsel', Ye. S. (1972), *Issledovaniye operatsiy* [Operations Research], Sov.Radio, Moscow, SU.
- Hanssman, F (1966), *Primeneniye matematicheskikh metodov v upravlenii proizvodstvom i zapasami* [Operations Research in Production and Inventory Control], Translated by Yudin, D, Progress, Moscow, SU.
- Koch, R (2004), *Printsip 80/20*, [The 80/20 Principle], Popurri, [Online], available at: <http://www.popuri.ru/site>
- Hulyayev, A. V., Zubaryev, O. V., Kanishchev, V. V. and Kolodyazhnyy, V. B. (2016), "Improving the efficiency of the system of maintenance and repair of weapons and military equipment", *Ozbroynennya ta viys'kova tekhnika*, no 2(10), pp.43-48.
- Goloshchapov, I. M. (1989), *Ekspluatatsiya bronetankovogo vooruzheniya i tekhniki*, [Operation of armored weapons and equipment], Moscow, SU.
- Onboard information system "HERMES-c2 (Command and Control) [Online], available at: <https://www.everest.ua/bortova-informatsiyna-systema-hermes-c2/>
- Joint Logistics (JP 4-0) [Online], available at: [http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/dod/joint/jp4\\_0\\_2008.pdf](http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/dod/joint/jp4_0_2008.pdf).

Received (Надійшла) 20.07.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

**Розроблення пропозицій удосконалення логістичного забезпечення підрозділу сил оборони держави через візуальне-графічне зображення обстановки та застосування математичних моделей дослідження операцій**

О. А. Макогон, Ю. В. Бабкін, К. Л. Баканов, В. І. Москаленко, М. В. Мосійчук, С. В. Піскун

**Анотація.** Предметом вивчення в статті є логістичне забезпечення підрозділу сил оборони держави при виконанні ним завдань за призначенням. **Метою дослідження** є розроблення математичної моделі для комплексного аналізу основних сил і засобів логістичного забезпечення та підвищення ефективності планування оснащення військового підрозділу засобами матеріально-технічного забезпечення в залежності від зміни тактичної обстановки. **Завдання дослідження:** формулювання задачі оптимізації логістичного забезпечення фахової діяльності підрозділу сил оборони держави, до складу якого входять основні підрозділи та підрозділи технічної підтримки, у термінах дослідження операцій; обґрунтувати можливість кваліфікації матеріального забезпечення підрозділу сил оборони держави та формування матриці транспортних витрат за допомогою АВС-аналіза; визначення технічних рішень щодо шляхів візуалізацію інформації для особи, що приймає рішення по логістичному забезпеченню та формування вихідної інформації для користувачів у потрібному форматі. **Методологічною основою** дослідження стали загальнонаукові та спеціальні методи наукового пізнання. **Отримані такі результати.** Задача оптимізації логістичного забезпечення фахової діяльності підрозділу сил оборони держави сформульована у термінах дослідження операцій. Показана кваліфікація матеріального забезпечення підрозділу сил оборони держави для формування матриці транспортних витрат за допомогою АВС-аналіза. **Висновки.** Задача оптимізації управління логістичним забезпеченням підрозділу колісно-гусеничних машин підрозділу сил оборони держави на основі використання сучасних принципів управління запасами може бути сформульована як цілочисельна задача лінійного програмування транспортного типу. За визначеними рисами потокового характеру логістичного забезпечення у компетенції заступника командира підрозділу сил оборони держави вхідна інформація є достатньою для проведення АВС-аналізу та на його основі формування матриці транспортних витрат. Візуалізація інформації у графічному режимі надасть змогу реалізувати інтерактивне відображення районів розташування підрозділів матеріально-технічного забезпечення, місця збірних пунктів пошкоджених машин, шляхи маневру, підвозу та евакуації пошкоджених зразків озброєння та військової техніки, тощо.

**Ключові слова:** логістичне забезпечення, колісно-гусеничні машини, матеріально-технічне забезпечення, цілочисельна задача лінійного програмування транспортного типу.

В. І. Масягін, А. М. Григоренко, К. М. Конох, О. А. Хахалкіна

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

## ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТОРІВ, ЯКІ ЗНИЖУЮТЬ ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ДИСКІВ ГТД ТА РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ПО ЇХ ПІДВИЩЕННЮ

**Анотація.** У даній статті проведено аналіз основних факторів, які впливають на надійність дисків компресорів та турбін, такі як: проектувальні, конструктивно-технологічні та експлуатаційні. Провівши розрахунок на міцність диску турбіни високого тиску будуються графіки зміни напружень та визначають коефіцієнт місцевої статичної міцності по радіусу диску. За результатами досліджень, запропоновано заходи підвищення надійності дисків, а саме: визначено сучасну технологію під назвою «Бліск», яка дозволяє збільшити коефіцієнт запасу статичної міцності диску та температуру газу перед турбіною на 5-7% , що призводить до збільшення потужності та дозволяє збільшити частоту обертання ротора на 15-40%.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, параметри надійності, напруження, диск турбіни.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Конкурентоспроможність та економічна ефективність авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) визначається рівнем їх надійності. Диски являються одним з найбільш напружених елементів та представляють максимальну потенціальну небезпеку з точки зору вторинних руйнувань елементів конструкції. Причинами руйнування дисків можуть бути: –конструктивні, –технологічні – експлуатаційні та інші фактори. Заданий рівень надійності повинен забезпечуватися впродовж всього часу експлуатації двигуна. Виконання зростаючих потреб до надійності дисків може бути досягнуто завдяки розробці оптимальної конструкції, вдосконалення технології виготовлення, максимальному та використанню максимальних можливостей матеріалу. Таким чином, питанням міцності дисків повинно приділятися підвищена увага при проектуванні та експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Надійність роботи двигуна залежить від точності розбірки та якості використання деталей двигуна. Так, у роботі [1] запропоновано методику оцінки надійності проєктованих деталей на етапі проєктування з урахуванням відхилень розмірів і режимів роботи деталі.

У роботі [1] викладено нові методи локального напружено-деформованого стану при термомеханічному навантаженні, наведено розрахунок міцності і довговічності з урахуванням основних факторів, що впливають на ресурс роторів турбоагрегатів. Дано алгоритми і їх програмна реалізація, що дозволяють розрахувати поля температур в роторах при довільній зміні температур середовищ.

**Мета статті** полягає у розгляді основних проблем, які змушують вирішувати для забезпечення статичної та динамічної міцності дисків; визначення факторів, які впливають на показники надійності дисків ГТД та аналізу заходів по їх підвищенню.

### Виклад основного матеріалу

Забезпечення міцності та надійності, під якою розуміється запобігання руйнування конструкції або недопустимої деформації елементів конструкції, є однією з головних задач проєктування, виробництва

та експлуатаційного обслуговування двигуна та дисків в цілому. Основною кількісною характеристикою надійності є вірогідність безвідмовної роботи двигуна в проміжку заданого ресурсу. Оскільки на стадії проєктування двигуна безпосередньо визначити ці характеристики важко, для оцінки міцнісної надійності користуються коефіцієнтами запасу міцності.

Найбільш напруженими конструктивними елементами газової турбіни є диски, робочі лопатки та соплові апарати. Вони виготовляються із жароміцних хромонікелевих сплавів які наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Матеріал деталей турбін (джерело: [2, С. 140])

	Деталь	Матеріал
Турбіна високого тиску		
1	Робочі лопатки	ЖС-26-НК (ЖС32-И)
2	Диск	ЭП-742-ИД
3	Обертовий дифлектор	ЭИ-698
4	Соплові лопатки	ЖС6К-ВИ
Турбіна низького тиску		
1	Робочі лопатки	ЖС6К-ВИ
2	Диск	ЭП-741П
3	Вал	ЭП-741П
4	Соплові лопатки	ЖС6К-ВИ

Умови роботи конструкційних матеріалів ТРД характеризуються багато виразністю експлуатаційних факторів, до яких в першу чергу слід віднести високі рівні напруження та температур, їх циклічність та тривалість, наявність хімічних активних робочих середовищ та ін. Під час виконання польотного завдання відбувається багаторазова зміна функціональних параметрів двигуна, кожні декілька секунд відбувається еволюція літального апарату. Змінюються його швидкість число Маха ( $M$ ), тангаж, рискання, висота польоту ( $H$ ) та змінюється число обертів двигуна ( $n$ ), витрата повітря ( $G_p$ ) та палива ( $G_{\text{пал}}$ ), температура газу після компресора ( $T_k$ ) та перед турбіною ( $T^*$ ).[3-5]

Одним із завдань проєктування двигуна є забезпечення гарантії того, що за час експлуатації не настане жодне з граничних станів його елементів, тобто не порушать умови їх нормального функціонування. Вирішення цього завдання – визначення

раціональних характеристик міцності при заданих показниках надійності. З теорії міцності при об'ємному напруженому стані коефіцієнт запасу міцності знаходить за умовою:

$$k = \sigma_g / \sigma_{\max} \geq [\sigma], \quad (1)$$

де  $\sigma_g$  – границя міцності для даного матеріалу;  $\sigma_{\max}$  – максимальне напруження деталі;  $\sigma$  – мінімальне допустиме значення коефіцієнта запасу міцності.

Мінімальне допустиме значення коефіцієнта запасу міцності на основі накопиченого досвіду конструкції та експлуатації дорівнює  $k = 1,35 \dots 1,5$ . При визначенні запасу міцності виникають труднощі у встановленні величини граничних напружень, з якими порівнюються розрахункові. Такі параметри міцності, як межа міцності (тривалої міцності) при фіксованій температурі або межа витривалості даного матеріалу у виробі – є випадковими величинами в зв'язку з існуванням допусків на хімічний склад матеріалу і технологію його одержання, неоднорідністю температурного режиму різних плавки і зовнішніх кліматичних умов, відхиленням умов термічної обробки сортаменту і ін.

За характером втрат праце спроможності відмови двигунів поділяються на дві групи.

До першої групи належать раптові відмови, що носять характер випадкового викиду: крихке руйнування; перевищення границі текучості в будь-якій точці деталі, для якої залишкові деформації недопустимі. До другої групи належать поступові відмови, виникаючі в результаті незворотного накопичення пошкоджень в деталі: накопичення пластичних деформацій (деформацій повзучості), втомних пошкоджень, приводячих до розвитку тріщини, механічний знос та ін.

Таким чином, при оцінці надійності дисків необхідно враховувати раптові та поступові відмови.

Поведінка реальних конструкцій обумовлено взаємодією цілого ряду факторів, що мають явно виражений випадковий характер. У зв'язку з цим визначення надійності конструкцій неможливо без застосування методів теорії ймовірностей і математичної статистики.

До особливостей дисків з точки зору оцінки показників надійності відносяться:

- порівняно невеликий обсяг статичної сукупності (в ряді випадків одиничні екземпляри);
- складність отримання досвідчених даних для подальшої обробки методом математичної статистики;
- складний характер і взаємопов'язаність процесів навантаження;
- підвищений вплив на надійність конструкцій стабільності технологічних процесів і складальних робіт [6].

Навантаження, які діють на конструкцію, як правило, надають багаторазовий вплив або розгортають свої ймовірні властивості в часі. Механічні властивості матеріалів, виготовлених в масовій кількості, можуть бути вивчені в повній мірі.

Таким чином, поведінка самій унікальній конструкції визначається випадковими чинниками масового характеру, для кожного з яких допускається статистичне тлумачення ймовірності. Передбачити на основі цього статистичного масиву даних поведінку конструкції – в цьому і полягає мета розрахунку надійності дисків.

Для авіаційних силових установок, відмова яких призводить до тяжких наслідків, велику небезпеку становлять раптові відмови. Найбільш частим проявом раптових відмов є поломки, деформації і розтріскування окремих деталей виробів і вузлів їх кріплення, що викликаються несприятливим поєднанням діючих навантажень і фактичної міцності (рис. 1.)

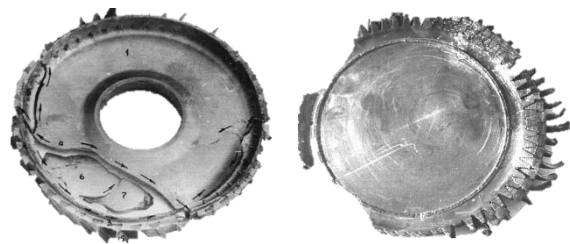


Рис. 1. Руйнування диску турбіни

Руйнування через порушення міцності можуть виникнути в результаті непередбачених місцевих напружень, викликаних нерозрахованих статичними або динамічними навантаженнями в поєднанні з невиявленими виробничими відхиленнями. Зазначені місцеві напруги і навантаження, як випадкові величини, істотно відрізняються від середніх величин, прийнятих при міцності розрахунках і оцінці ресурсу виробу [7].

Обчислення мінімальних запасів міцності, що гарантують надійну роботу протягом ресурсу, ускладняється тим, що двигун експлуатується в різних режимах. Тому завдання про необхідні запаси міцності можна ставити тільки в імовірнісному плані.

Введемо поняття функції якості (запасу працездатності) [2]

$$\varphi = \sigma_{пред} - \sigma_p, \quad (2)$$

де  $\sigma_{пред}$  – граничні напруги (межа тривалої міцності, межа витривалості та ін.);  $\sigma_p$  – робоча напруга в розрахунковому перетині.

Для надійної роботи деталі двигуна необхідне збереження умови:

$$\varphi > 0. \quad (3)$$

На надійність роботи диска ГТД впливають різноманітні фактори, але серед них можна виділити найбільш очевидні, які можуть надавати найбільший вплив на надійність роботи. При виробництві ці параметри неможливо витримати точними, тому на них призначаються допуски з урахуванням досягнень сучасної технології, витрат на виготовлення і вартості остаточного виробу, умов збірки, оптимальної роботи і т.д. За відсутності допусків, розки-

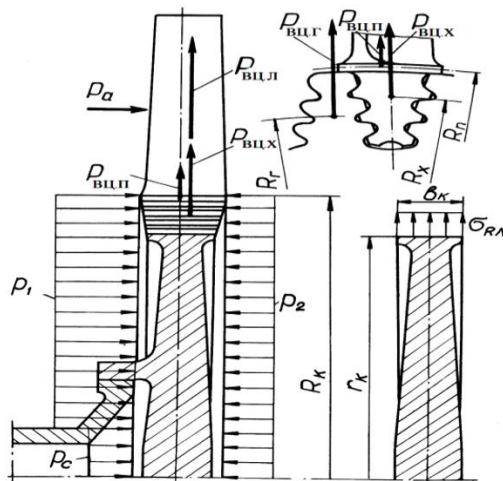
ду параметрів і умов роботи, виріб мав можливість працювати безвідмовно. Але в дійсності допуски на параметри можуть скластися найсприятливішим чином, що призводить до втрати працездатності виробу.

Проводячи аналіз роботи диску турбіни двигуна, можна виділити такі параметри, які найбільш очевидно впливають на працездатність диска і є зручними для замірів:

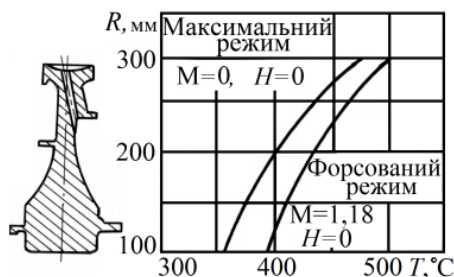
- геометричні розміри;
- частота обертів;
- щільність матеріалу диска.

Допуски цих параметрів визначають якомога точними. В іншому випадку дані фактори в сукупності з іншими можуть привести до небажаних результатів [8].

Розрахунок з визначення надійності диску являє собою розрахунок усього ротору, в склад якого входить конкретний диск. Розрахунок ротору виконується з врахуванням експлуатаційних факторів впливових на напружений стан диску. (рис. 2, 3)



**Рис. 2.** Контурне навантаження диска газової турбіни та його розрахункова схема (джерело: розроблено авторами за даними [2, С.292])



**Рис. 3.** Тепловий стан диска (джерело: розроблено авторами за даними [2, С.146])

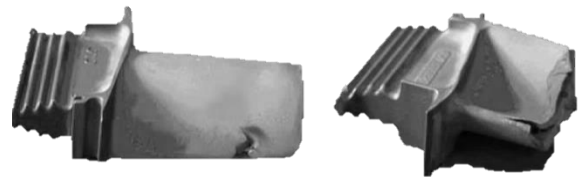
Із отриманого розрахунку для моделі конкретного диску формуються граничні умови для виконання розрахунку напруженого стану диску. Характер розподілу напруг по диску носить нерівномірний характер. Виділяються зони концентрації напруження, котрі прийнято називати критичними зонами. Як правило, у дисках в ці зони розташовуються біля основи між пазових виступів, які можуть

привести до розтріскування. Напруження критичних зон визначає циклічний ресурс деталі. Причиною виникнення тріщин частіше за все є термічна втомлюваність, що виникає в матеріалі при повторних термічних навантаженнях в момент запуску та зупинки ГТД.

Небезпечні руйнування дисків можуть бути наслідком перегріву та статичного перевантаження (наприклад, внаслідок перевищення обмежень частоти обертання ротору). Диски, що виготовлені з порушенням належного технологічного процесу, внаслідок тривалої роботи при високих температурах втрачають пластичність, що може призвести до їх крихкого руйнування навіть при відносно невеликому збільшенні статичної напруженості. [9]

Збільшення вібрації двигунів повинні розглядатися як самостійна відмова (або несправність), якщо це не є наслідком іншої відмови, наприклад, обриву лопатки. Причиною виникнення підвищення вібрацій ГТД може бути зміна натягів по посадковим поясам роторних та статорних деталей, у тому числі ослаблення під дією відцентрових сил натягу дисків на своїх посадкових місцях. Високі вібрації можуть виникати в результаті появи при експлуатації двигуна критичних (близьких до робочих) частот обертання, наприклад, внаслідок недостатньої стабільності рівня жорсткості опор.

У ряді випадків буває важко визначити причини відмови двигуна. Наприклад, руйнування може бути пов'язана з тим, що до її недостатньої конструктивної міцності додалось певне виробниче відхилення. Не завжди просто однозначно кваліфікувати фізичну причину відмови. Так, руйнування диску турбіни (рис. 4) може бути наслідком вибору недостатньо міцного матеріалу лопатки чи самого диска. Таким чином, велика кількість поломок турбінних лопаток мають втомлювальний характер. Ці поломки виникають внаслідок змінних напружень, що виникають в лопатках при їх коливаннях.



**Рис. 4.** Руйнування лопаток турбіни

У більшості випадків руйнування лопаток пов'язані з їх резонансними коливаннями. Найбільш неприємні руйнування лопаток внаслідок коливань за основним тоном, при цьому відбувається обривання більшої частини або навіть всього пера лопатки (біля кореня). При інтенсивних коливаннях лопаток за основним тоном втомлювальним руйнуванням та розтріскуванням можуть піддаватись і замки лопаток. Причини вібраційних поломок турбінних лопаток далеко не завжди пов'язані з недостатнім запасом міцності. При виготовленні лопаток цей запас у ряді випадків може знижуватись через відхилення розмірів лопаток, а також припалить (технологічних порушень в процесі термообробки), утворення у поверхневому шарі розтягую-

чих напружень та інших факторів, що знижують опір втомлюваності. Однією з причин зменшення запасів міцності в процесі експлуатації є корозійне ушкодження матеріалу лопаток, у тому числі газова корозія турбінних лопаток, яка викликана наявністю у паливах та продуктах їх згоряння хімічно активних з'єднань. [7-9].

При роботі газотурбінного двигуна на лопатки діють статичні, динамічні і температурні навантаження, викликаючи складну картину напружень.

Також фактори, що призводять до накопичення ушкоджень: змінні термічні напруження, повторні статичні напруження при високих температурах, перегрів робочих лопаток (наприклад, місцеві – через нерівномірні по радіусу поля температур). Останні різко знижують опір тривалому статичному навантаженню, що може призвести до обриву лопаток із характерними слідами пластичної деформації. Перегрів соплових лопаток викликаються, зазвичай, кільцевою нерівномірністю температурного поля.

Тріщини та руйнування дисків турбін відносяться до найбільш небезпечних видів відмов, бо при обриві частини диску руйнування в багатьох випадках не локалізуються в межах корпусу двигуна. Часто, в процесі розвитку тріщин, в диску виникає збільшення рівня загальних вібрацій двигуна (з роторною частотою), що може служити діагностичною ознакою цієї відмови та дозволяє запобігти руйнуванню диска при своєчасному вимкненні двигуна. [8]

Розрахунок на міцність пера лопатки виконується, враховуючи вплив тільки статичних навантажень. До них відносяться відцентрові сили мас (ваги) лопаток, які з'являються при обертанні ротора, і газові сили, що виникають при обтіканні газом профілю пера лопатки і в зв'язку з наявністю різниці тисків газу перед і за лопаткою. Відцентрові сили викликають деформації розтягування, вигину і крутіння, газові – деформації вигину і крутіння. Напруження кручення від відцентрових, газових сил слабо закручених робочих лопаток компресора малі, і ними зазвичай нехтують. Напруги розтягнення від відцентрових сил є найбільш суттєвими. Напруження згину зазвичай менші напружень розтягу, причому за необхідності для зменшення згинальних напружень в лопатці від газових сил її проєктують так, щоб виникаючі згинальні моменти від відцентрових сил були протилежні за знаком моментам від газових сил і, отже, зменшували останні.

Інтенсивність газових сил на середньому радіусі в окружному напрямку визначається за формулою:

$$P_u = \frac{G_g}{h_n \cdot z} \cdot (W_{1u} - W_{2u}) \cdot \quad (4)$$

Для визначення частоти власних згинальних коливань лопаток по різних формах (простих чи складних) користуються різними методами розрахунку, наприклад: енергетичним методом.

Згідно з цим законом для вільних коливань пружної системи без урахування сил опору сума кінетичної і потенційної енергій зберігається весь

час незмінною. Суть методу полягає в тому, що обчислюються максимальні значення потенційної енергії лопатки в її крайньому положенні, а кінетичної енергії - в середньому.

Обертання лопатки спільно з диском, на якому вона закріплена, впливає на її коливання, так як відцентрова сила прагне повернути лопатку в положення рівноваги.

Дія відцентрової сили лопатки призводить до того ж результату, що і збільшення жорсткості, тому частота власних коливань лопатки (динамічна частота) підвищується.

Динамічна частота власних згинальних коливань лопатки визначається за формулою:

$$f_{дин} = \sqrt{f_c^2 + Bn_c^2}, \quad (5)$$

де  $f$  – власна частота лопатки;  $n_c$  – частота обертання ротора за секунду, об/с;  $B$  – коефіцієнт пропорційності, що залежить від геометрії лопатки і форми пружної лінії.

Визначивши коефіцієнт і задавшись декількома значеннями частот в діапазоні робочих частот обертання двигуна, знаходимо відповідні величини динамічних частот власних коливань лопатки і будуюмо частотну діаграму.

Для побудови частотної діаграми (рис. 5) необхідно нанести на графік діапазон робочих частот обертання двигуна від оборотів малого газу до максимальних обертів.

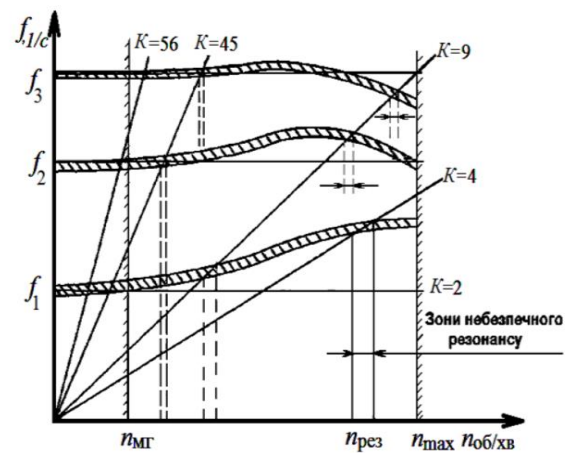


Рис. 5. Частотна діаграма (джерело: розроблено авторами за даними [2, С.321])

За частоту обертання ротора на режимі малого газу прийнято для ГТД:

$$n_{мг} = (0,8...0,9)n_{\max} \cdot \quad (6)$$

Для визначення резонансних режимів роботи двигуна з урахуванням прийнятого масштабу нанести на графік пучок прямих ліній, що виходять з початку координат, які представляють собою частоти коливання гармонік збуджуючих сил, описуваних рівнянням:

$$f_g = k \cdot n_c, \quad (7)$$

де  $k$  - порядок гармонік збуджуючих сил.

Точки перетину променів з кривою зміни дадуть резонансні частоти обертання двигуна. Наявність резонансних режимів в робочій зоні виключено. За результатами розрахунку будується частотна діаграма.

Диски турбін - це найбільш відповідальні елементи конструкцій газотурбінних двигунів. Від досконалості конструкцій дисків залежить надійність, легкість конструкцій двигунів в цілому. Метою розрахунку є визначення напружень і запасів міцності в різних перетинах по радіусу диска.

Диски знаходяться під впливом інерційних відцентрових сил, що виникають при обертанні від маси робочих лопаток і власної маси дисків. Ці сили викликають в дисках напруження розтягу. Від нерівномірного нагрівання дисків турбін виникають температурні напруги, які можуть викликати як розтягування, так і стиснення елементів диска.

Крім напружень розтягування і стиснення, в дисках можуть виникати напруги крутіння і вигину. Напруження кручення з'являються, якщо диски передають крутний момент [8-11].

З перерахованих напружень найбільш істотними є напруги від відцентрових сил власної маси диска і лопаточного вінця, а також температурні (в разі нерівномірного нагрівання диска). Напруження згину залежать від товщини диска і способу з'єднання дисків між собою і з валом і можуть бути значними лише в тонких дисках. Напруження кручення зазвичай невеликі і в розрахунках в більшості випадків не враховуються.

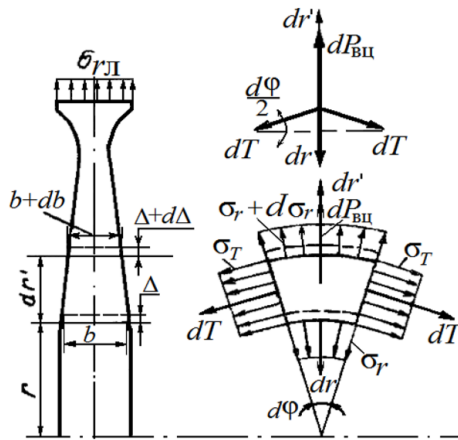


Рис. 6. Розрахункова схема диска для виведення рівнянь його міцності (джерело: розроблено авторами за даними [2, С.293])

Напруження  $\sigma_{Rл}$  від відцентрових сил лопаток і замкової частини обода може бути визначено як

$$\sigma_{Rл} = \frac{z \cdot \sigma_{pk} \cdot F_k + \rho \cdot f \cdot 2\pi \cdot R_f^2 \cdot \omega}{2\pi \cdot R_k \cdot b_k}, \quad (8)$$

де  $z$  – число лопаток на ободі диска;  $\sigma_{pk}$  – напруга в кореневому перерізі лопатки від розтягування відцентровими силами;  $F_k$  – площа кореневого перетину лопатки;  $\rho$  – щільність матеріалу диска і лопатки;  $f$  – площа радіального перетину розріз-

ний частини обода диска;  $R_f$  – радіус центра ваги площі  $f$ ;  $R_k$  – зовнішній радіус нерозрізного обода диска;  $b_k$  – ширина обода диска на радіусі  $R_k$ .

За результатами розрахунку будуються графіки зміни напружень  $\sigma_R, \sigma_T, \sigma_{екв}$  і запасів міцності по радіусу диска [4].

Таким чином можна сказати, що забезпечення високої і стабільної конструкційної міцності двигунів, під якою розуміється міцність конструкції в реальних умовах роботи з урахуванням металургійних, конструктивно-технологічних і експлуатаційних факторів - один із напрямів вирішення проблеми підвищення надійності дисків ГТД.

Пошук шляхів досягнення найбільшого опору руйнуванню матеріалу конструкції в нерівномірному полі температур привів до ідеї застосування біметалевих з'єднань (конструкція, відома під назвою «Блиск»). Для виготовлення таких біметалевих конструкцій можна застосувати спосіб ізотермічного штампування, що дозволяє з'єднати лопатки і диск, виконані з різних сплавів. Технологія виготовлення таких складових конструкцій заснована на спіканні лопаток з порошковим сплавом, утворюючим диск. Використання для замкової частини лопатки міцнішого при відповідних умовах роботи сплаву, з якого виготовляються диски, або взагалі - виняток замкового з'єднання дозволяють зменшити масу робочого колеса, а його ресурс збільшити.

Головна перевага Блиск - можливість зниження на 20-30% маси робочого колеса веде до: зменшення інерційності ротора, а значить поліпшення його динамічних характеристик, тобто зменшення часу прийомистості, полегшення запуску двигуна, зменшення питомої ваги двигуна, збільшення дальності. Відсутність замкових з'єднань дозволяє вирішити проблему розміщення лопаток на диску і усунути виток в замковому з'єднанні, тобто оптимізувати густоту решітки по газодинамічній ефективності, що може привести до підвищення ККД на 1-1.2% і, відповідно, до виграшу в паливній економічності.



Рис. 7. Технологія біметалічних з'єднань

Виключення концентраторів напружень в замкових з'єднаннях дозволяє збільшити довговічність колеса в 2-3 рази. Збільшення на 40-50% мінімальних місцевих запасів тривалої статичної міцності дозволяє збільшити температуру газу перед турбіною на 5-7%, що призводить до збільшення потужності та дозволяє збільшити частоту обертання ротора на 15-40%.

## Висновки

В статті особлива увага представлена визначенню основних факторів які впливають на надійність дисків ГТД, такі як: конструктивні, технологічні та експлуатаційні. Також факторів, що призводять до накопичення ушкоджень: змінні термічні напруження, повторні статичні напруження при високих температурах, перегрів робочих лопаток (наприклад, місцеві – через нерівномірні по радіусу поля температура). Високі вібрації можуть виникати в результаті

появи при експлуатації двигуна критичних (близьких до робочих) частот обертання, наприклад, внаслідок недостатньої стабільності рівня жорсткості опор. Виявлено які сили та моменти діють на диск, від чого залежить руйнування дисків та які заходи застосовують для збільшення надійності дисків, а отже і збільшенню ресурсу двигуна. З урахуванням усіх факторів, було запропоновано сучасний спосіб виготовлення дисків ГТД шляхом біметалічних з'єднань. Дана технологія має назву «Бліск», яка дозволяє вирішити проблему надійності дисків.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Белоусов, А.И., Биргер И. А. Прочностная надежность деталей турбомашин / А.И. Белоусов, И.А. Биргер. – Куйбышев: Ку-АИ, 1983. – 75с.
2. Масыгин В. И. Конструкция та міцність авіаційних двигунів : курс лекцій / В. И. Масыгин, В. В. Самулєв, Н. М. Отрешко. – Х. : ХУПС, 2014. – 464 с.
3. Скубачевский, Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей: Учебник для студентов авиационных вузов / Г.С. Скубачевский. – М.: Машиностроение, 1974. – 520 с.
4. Расчет термонапряжений и прочности роторов и корпусов турбин / К.В. Фролов, Ю.Л. Израилев, Н.А. Махутов и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 239с.:
5. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей летательных аппаратов / В.И. Локай, М.Н. Бодунов, В.В. Жуйков, А.В. Щукин. – М.: Машиностроение, 1985. – 216 с.
6. Косточкин, В.В. Надежность авиационных двигателей и силовых установок: Учебник для студентов / В.В. Косточкин. – М.: Машиностроение, 1976. – 248с.
7. Акимов, В.М. Основы надежности газотурбинных двигателей: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / В.М. Акимов. – М.: Машиностроение, 1981. – 207 с.
8. Шулов, В.А. Модификация поверхности деталей из жаропрочных сталей сильноточными импульсными электронными пучками. / В.А. Шулов, А.Г. Пайкин, А.Б. Белов // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 2. – С. 61-70.
9. Каблов, Е.Н. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД [Электронный ресурс]. ВИАМ. – 2012.
10. Дарчинов Э.Н. Специфика входного контроля и вопросы его стандартизации / Э.Н. Дарчинов // Стандарты и качество. – 1973. – № 8. – С. 24-26.
11. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентил-тора: моногр. Часть 1 / А. В. Богуслаев и др. – Запорожье, изд. ОАО “Мотор Сич”, 2003. – 396 с.
12. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины: моногр. Часть 2 / А.В. Богуслаев, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк, В.К. Яценко, А.Я. Качан, Э.И. Цивирко, С.Б. Беликов, М.Р. Орлов, В.Е. Замковой, В.Ф. Мозговой, О.В. Рубель. – Запорожье, изд. ОАО “Мотор Сич”, 2003. – 420 с.
13. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей: моногр. / А.В. Богуслаев, А.А. Олейник, А.А. Олейник, Д.В. Павленко, С.А. Суботин; под ред. Д.В. Павленко, С.А. Суботина. – Запорожье: ОАО “Мотор-Сич”, 2009. – 468 с.
14. Кишалов А.Е., Кудоярова В.М., Маркина К.В., Игнатъев О.И. Анализ нагрузок, действующих на элементы конструкции ГТД // Молодой учёный. 2012. № 11 (46). С. 52-60.

Received (Надійшла) 27.07.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

**Determination of factors decreasing indicators of reliability of disks of a gas-tube engine and development of measures to increase them**

Valeriy Masyagin, Alina Hryhorenko, Katya Konokh, Oleksandra Khakhalkina

**Abstract.** In this article, special attention is paid to identifying the main factors that affect the reliability of the disks of the gas turbine engine. Determining that dangerous drive control can occur when the engine is running in different flight modes. The disks are under the influence of inertial centrifugal forces arising from the rotation of the mass of the blades and the own mass of the disks. These forces cause tensile stresses in the disks. Uneven heating of the turbine blades causes temperature stresses that can cause both stretching and compression of the disk elements. In addition to tensile and compressive stresses, torsional and bending stresses may occur in the disks. Torsional stresses occur when the discs transmit torque. Of these voltages, the most significant are the voltages from the centrifugal forces of the mass of the disk and the scapula, as well as temperature (in the case of uneven heating of the disk). The bending stresses depend on the thickness of the disk and the method of connecting the disks with each other and with the shaft and can be significant only in thin disks. Torsional stresses are usually small and in most cases are not taken into account in the calculations. From the obtained data we can say that for models of a particular disk are formed boundary conditions for calculations of the stress state of the disk. Disks made in violation of the technological process, as a result of prolonged operation at high temperatures, lose their ductility, which can lead to their tiny control, even in comparison with a small amount of increased static voltage. For the results of the calculation of future graphics, the voltage on the radio will change. and strength reserves. To increase the reliability of the disk, you can use various methods, such as the method of creating a disk for the technology of bimetallic connection to the disk. This technology can increase the duration of the team by 2-3 times, which will increase the service life.

**Keywords:** gas turbine engine, reliability parameters, strength, resource, stresses, turbine disk.

В. І. Носков<sup>1</sup>, В. С. Блиндюк<sup>2</sup>, В. В. Скородєлов<sup>1</sup>, Г. В. Гейко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна

## ПЕРЕВІРКА І НАЛАШТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ У СТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМАХ

**Анотація.** При розробці електропередачі вітчизняного дизель-поїзда ДЕЛ-02 з тяговими асинхронними двигунами, вирішувалося питання можливості перевірки в умовах депо його основних характеристик. Для цього потрібно було забезпечити в стаціонарних режимах навантаження та контроль роботи дизель-генераторної установки, перетворювача частоти і тягових двигунів без використання додаткового устаткування. Для забезпечення надійності експлуатаційних характеристик дизель-поїзда в систему керування електропередачі введена система контролю і діагностики основних параметрів в процесі руху. Крім того, з урахуванням особливостей схеми електропередачі, передбачена можливість перевірки і налаштування її параметрів у стаціонарних режимах. Із цією метою запропоновано та обґрунтовано використання гальмового резистора у якості навантаження дизель-генератора, а перетворювач частоти при цьому навантажується на загальмовані тягові двигуни. При цьому система регулювання залишається замкнутою, а реєстрація параметрів виконується системою контролю і діагностики.

**Ключові слова:** тяговий асинхронний двигун, дизель-поїзд, система контролю і діагностики, гальмовий резистор.

### Вступ

Ефективність перевезень залізничним транспортом у першу чергу залежить від надійності його роботи. Для забезпечення надійності роботи локомотива в його схему керування складовою частиною вводиться система контролю і діагностики, яка видає машиністу оперативну інформацію про роботу його основних складових: дизеля, електропередачі, системи керування та ін. У той же час потрібно перевіряти і, при необхідності, налаштовувати характеристики локомотива в стаціонарних режимах. Особливістю схеми електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02 є наявність електричного гальмування, що дозволяє здійснювати перевірку характеристик дизель-генератора навантаженням на гальмовий резистор без використання додаткового устаткування.

**Аналіз літератури.** Виконання систем регулювання електропередачею із використанням сучасних засобів мікропроцесорної техніки та мікроЕОМ дає можливість реалізувати як ефективне керування, так і контроль роботи устаткування при експлуатації [1-4]. Основна увага авторів приділяється питанням створення бортових систем контролю і діагностики, які забезпечують машиніста необхідною інформацією про роботу основних елементів локомотива, а також автоматизованим системам з дистанційним контролем окремих вузлів локомотива при його русі по перегону. У той же час, питанню стаціонарної перевірки технічного стану локомотива не приділено належної уваги, особливо для автономних локомотивів із сучасним тяговим асинхронним приводом [5, 6].

В статті розглядається питання перевірки, а, при необхідності, налаштування характеристик тягової електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02 у стаціонарних режимах без використання додаткового устаткування. Для досягнення цієї мети було проведено:

- аналіз схеми електропередачі з урахуванням реалізації необхідних режимів роботи;
- розгляд можливого використання системи регулювання та системи контролю і діагностики (СКД);

– розробку методів перевірки характеристик тягової електропередачі та якості роботи системи автоматичного регулювання (САР) без використання додаткового устаткування.

### Основна частина

В процесі експлуатації параметри автономних локомотивів можуть відхилятися від необхідних значень, що негативно позначається на їх технічних і економічних показниках. У зв'язку із цим, в умовах депо необхідно мати можливість їхнього контролю, відновлення і налаштування [6-8]. При наявності в депо водяного реостата, перевірка дизель-генератора виконується його навантаженням через штатну випрямну установку локомотива на реостат.

Реостат являє собою бак, наповнений водою, у який опущені рухомі та нерухомі електроди (пластини). До рухомих і нерухомих електродів приєднані силові кабелі від випрямної установки локомотива. Величина опору реостата залежить від ступеня занурення у воду рухомих пластин, що дозволяє виконати контроль і, при необхідності, налаштувати на відповідність технічним вимогам селективну (1) і зовнішню (2) характеристики генератора (рис. 1) з обмеженнями по струму (А), напрузі (В) і потужності (С). Селективна характеристика відповідає потужності, яка відбирається від дизель-генератора на тягу, без обліку потужності допоміжних навантажень і опалення салонів вагонів (якщо воно є). Зовнішня характеристика – це повна потужність, яку розвиває дизель на конкретній позиції контролера машиніста (КМ). Структурна схема електропередачі моторного вагона дизель-поїзда ДЕЛ-02 наведена на рис. 2. Тяговий генератор, що обертається від дизеля, через випрямну установку (ВУ) і автономні інвертори напруги (АН1, АН2) живить тягові асинхронні двигуни (ТАД1, ТАД2). Особливістю цієї схеми є те, що від тягового генератора через ВУ та перетворювачі частоти власних потреб (ПЧВП) живляться всі допоміжні споживачі, у тому числі й опалення вагонів. При цьому їх сумарна споживана потужність становить 45 кВт.



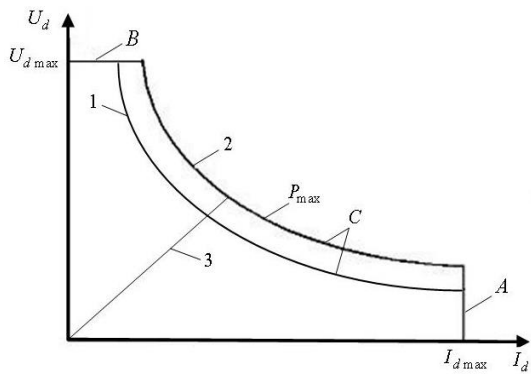


Рис. 1. Характеристики генератора ( $U_d$ ,  $I_d$ ,  $P$  – випрямлена напруга, струм і потужність генератора)

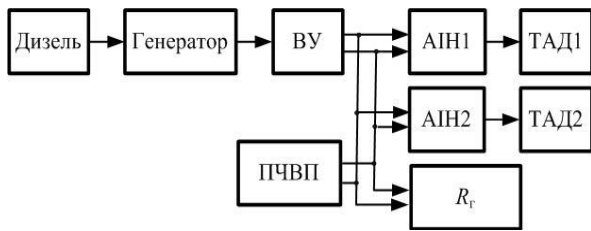


Рис. 2. Структурна схема електропередачі моторного вагона дизель-поїзда ДЕЛ-02

При електричному гальмуванні ТАД працюють у режимі генераторів і через АІН1 та АІН2 навантажуються на гальмовий резистор  $R_r$ , тяговий генератор відключається від ланцюга постійної напруги випрямлячем ВУ, вентилі якого заперті зворотною напругою на ньому. На дизель-поїзді застосовано дизель з електронним регулятором. Універсальна характеристика дизеля наведена на рис. 3.

Тяговий генератор являє собою синхронну електричну машину з незалежним збудником, що має дві трифазні статорні обмотки, від яких через випрямляч одержують живлення тягові інвертори, перетворювачі власних потреб і система опалення вагонів. ТАД – це трифазна асинхронна реверсивна електрична машина з короткозамкненим ротором. Завдання збудника тягового генератора і регулювання режимами роботи електропередачі здійснюється мікропроцесорною системою [9].

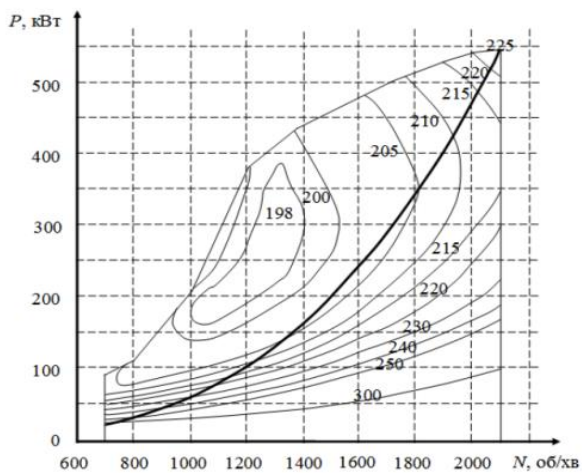


Рис. 3. Універсальна характеристика дизеля 12V 183TDB

Функціональна схема системи регулювання і контролю параметрів моторного вагона дизель-поїзда ДЕЛ-02 наведена на рис. 4.

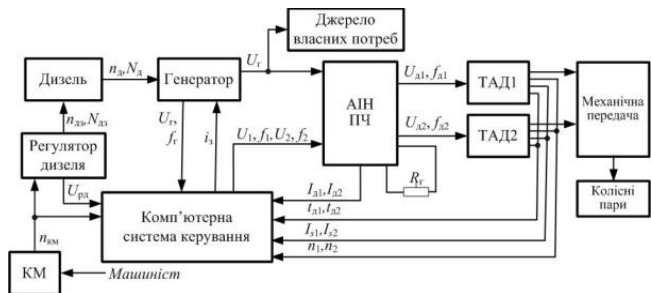


Рис. 4. Функціональна схема системи регулювання і контролю параметрів моторного вагона дизель-поїзда ДЕЛ-02

На рис. 4 приведені такі позначення: КМ – контролер машиніста; ПЧ – перетворювач частоти;  $n_{км}$  – номер позиції контролера машиніста;  $n_{дз}$ ,  $N_{дз}$  – сигнали завдання частоти обертання та потужності дизеля;  $n_d$ ,  $N_d$  – вихідні частота обертання та потужність дизеля;  $U_{pd}$  – коригуючий сигнал потужності дизеля;  $U_e$ ,  $f_e$  – напруга і частота генератора;  $i_3$  – струм збудження генератора;  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  – завдання параметрів ПЧ;  $f_{d1}$ ,  $f_{d2}$ ,  $U_{d1}$ ,  $U_{d2}$  – частоти та напруги живлення ТАД1 і ТАД2;  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  – значення активного струму ТАД1 і ТАД2;  $t_{d1}$ ,  $t_{d2}$  – температура ТАД1 і ТАД2;  $n_1$ ,  $n_2$  – частоти обертання роторів ТАД1 і ТАД2;  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$  – значення повного струму ТАД1 і ТАД2.

Перевірці підлягають: дизель-генератор, перетворювач частоти, тягові асинхронні двигуни і система регулювання електропередачі. Оскільки на дизель-поїзді реалізована система електричного гальмування, при якій гальмова потужність розсіюється на гальмовому резисторі, це дозволяє виконати перевірку характеристик дизель-генератора навантаженням через штатний випрямляч на гальмовий резистор при повній потужності дизеля без використання водяного реостата.

Схема включення гальмового резистора при навантаженні дизель-генератора наведена на рис. 5. При цьому тягові інвертори відключаються від випрямляча. Сигнали з вимірювальних шунтів, які пропорційні випрявленому струму навантаження генератора, надходять у схему регулювання контролю і діагностики.

У зв'язку з тим, що величина гальмового резистора незмінна, характеристики  $U_d = f(I_d)$  або  $P = U_d \cdot I_d$  по позиціях КМ мають вигляд прямої лінії 3 (рис. 1). Вимірювана потужність повинна відповідати необхідній відповідно до універсальної характеристики дизеля. До складу мікропроцесорної системи керування входить СКД [9], що істотно спрощує виконання цієї роботи, тому що всі основні параметри електропередачі виведені на екран

комп'ютера як у цифровому виді, так і у вигляді осцилограм. Якість роботи дизель-генераторної установки варто розглядати в цілому, з огляду на той факт, що системи регулювання дизеля і генератора мають безпосередні зв'язки і взаємний вплив. Електронний регулятор дизеля забезпечує підтримку заданої частоти обертання і потужності по позиціях КМ при змінних умовах навантаження, крім того, визначає і видає зовнішній сигнал про ступінь завантаження дизеля (сигнал неузгодженості потужності). САР тягового генератора (рис. 6) виконана по комбінованому принципу: замкнута САР по відхиленню доповнена регулюванням по збуренню.

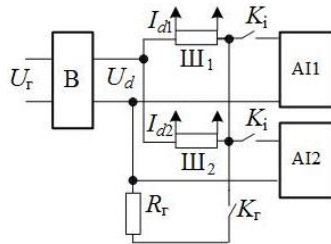


Рис. 5. Схема навантаження дизель-генератора на гальмовий резистор (В – випрямляч,  $U_d$  – випрямлена напруга генератора, AI1, AI2 – автономні інвертори,  $K_c, K_i$  – контактори,  $\text{Ш}_1, \text{Ш}_2$  – вимірвальні шунти,  $U_2$  – напруга генератора,  $I_d$  – струм навантаження на резисторі)

Сигнал завдання  $e_3$  у системі регулювання генератора формується як функція обертів дизеля  $e_i$  (позиції КМ), а його коригування здійснюється сигналом неузгодженості потужності від регулятора

дизеля ( $e_{pd}$ ) і сигналом включення допоміжних навантажень і опалення ( $e_{cn}$ ):

$$e_3 = e_i \pm e_{pd} \pm e_{cn}.$$

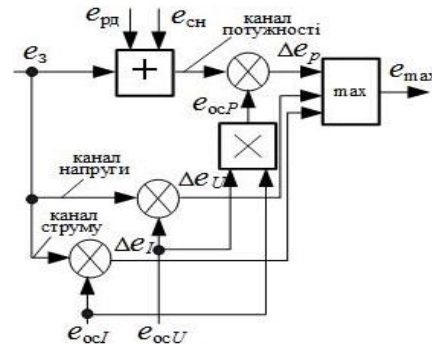


Рис. 6. Схема формування характеристик дизель-генератора

Застосування комбінованого принципу регулювання забезпечує його високу якість і повне використання потужності дизеля відповідно до його характеристик. У табл. 1 наведені результати навантаження дизель-генератора на гальмовий резистор моторного вагона дизель-поїзда ДЕЛ-02 у моторвагонному депо «Христинівка» регіональної філії «Одеська залізниця».

Як видно з табл. 1, характеристика  $P_2 = f(n)$  повністю відповідає необхідним значенням на всіх позиціях КМ, що підтверджується вихідним сигналом регулятора дизеля, який дорівнює 5 В.

Таблиця 1–Результати навантаження дизель-генератора на гальмовий резистор моторного вагона дизель-поїзда ДЕЛ-02 у моторвагонному депо «Христинівка» регіональної філії «Одеська залізниця»

№ позиції КМ	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Обороти дизеля, об/хвил.	800	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2100
Потужність СГ, P <sub>г</sub> , кВт	68,5	72	129	191,7	250	330	381	441	462,3
Сигнал регулятора дизеля, е <sub>рд</sub> , В	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0

Відхилення від значення 5 В означають невідповідність потужності дизеля його оптимальному значенню на конкретній позиції КМ. Перевірка якості роботи перетворювача частоти і ТАД у замкнутій САР виконується на загальмованому локомотиві. При рушанні з місця і розгоні, електропередача забезпечує сталість тягового зусилля, тобто тягові двигуни працюють із постійним моментом (рис. 7).

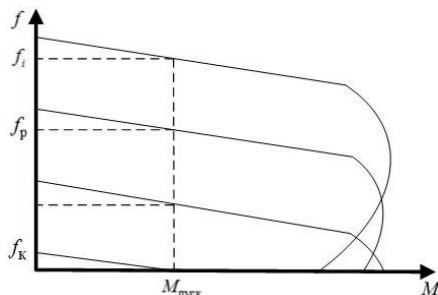


Рис. 7. Механічні характеристики ТАД при рушанні з місця і розгоні ( $M_{\text{пуск}}$  – пусковий момент,  $f$  – частота живлячої напруги,  $f_1$  – частота, пропорційна частоті обертання ротора,  $f_k = f_1 - f_p$  – частота ковзання ротора)

Оскільки ТАД нерухомий, тобто  $f = f_k$ , можна користуватися його статичними характеристиками, вважаючи, що:

$$M \equiv I \cdot \Phi,$$

де  $I$  – струм фази,  $\Phi = E / f$  – магнітний потік ТАД.

Задаючи розрахункове значення  $f = f_k$ , САР підтримує постійною задану величину струму і магнітного потоку, залежно від позиції КМ, тобто забезпечує необхідне тягове зусилля дизель-поїзда при рушанні з місця. За формою фазних струмів і напруги на виході ПЧ можна зробити висновок про справність ПЧ і ТАД, а в цілому – по якості роботи тягового електропривода [10].

На рис. 8 наведена осцилограма фазного струму тягового двигуна в «стоповому» режимі при частоті живлячої напруги  $\sim 0,5$  Гц і процес включення електропередачі в режимі тяги.

Крім того, при статичних випробуваннях можна перевірити і, при необхідності, налаштувати захист електропередачі від перевищення значення його параметрів.

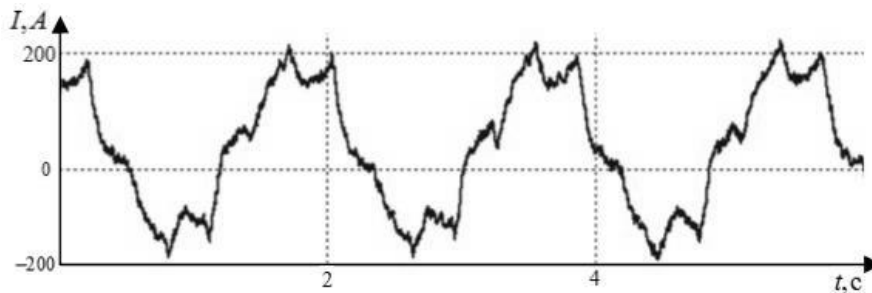


Рис. 8. Осцилограма фазного струму ТАД при загальмованому двигуні

Розроблений метод перевірки характеристик тягової електропередачі використовується при експлуатації дизель-поїздів ДЕЛ-02 на Одеській залізниці.

### Висновки

Проведено аналіз схеми електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02 з урахуванням його характеристик при роботі в режимі тяги та електричного гальмування, а також реалізація системи автоматичного регулювання і системи контролю і діагностики.

Результати аналізу дозволили розробити метод перевірки характеристик тягової електропередачі та якості роботи САР у стаціонарних режимах без використання додаткового устаткування. Запропоновано виконувати перевірку характеристик дизель-генератора навантаженням його на гальмовий резистор, а перетворювачі частоти і ТАД – при загальмованих тягових двигунах. При всіх випробуваннях використовується замкнута САР електропривода, а контроль параметрів здійснюється за допомогою СКД.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Боднар Є.Б. Основні вимоги та принципи створення бортових систем діагностування локомотивів / Є.Б. Боднар. – Наука та прогрес транспорту. 2014. – № 1 (49). – С. 68 – 74.
2. Мельников В. Диагностирование тепловозов по данным бортовых микропроцессорных систем / В. Мельников // Мир транспорта. – № 3, 2014. – С. 56 – 60.
3. Нургулжанова А.Н. Анализ систем диагностики технического состояния локомотивов и вагонов при движении железнодорожных составов / А.Н. Нургулжанова, Э.А. Багыбаева // Материалы ХLI Межд. НПК. КазАТК им. М. Тынышпаева «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика». – Т.2, 2017. – С. 169 – 171.
4. Бабков Ю. Многофункциональная микропроцессорная система управления тепловозом / Ю. Бабков и др. – Железнодорожный транспорт. СТА № 3, 2004. – С. 46 – 52.
5. Басов Г.Г. Развитие электричного моторвагонного рухомого складу. Ч. 1. / Г.Г. Басов, С.І. Яцько. – Харків: Апекс+, 2005. – 248 с.
6. Белоглазов А.К. Оценка эффективности работы дизель-генераторных установок по результатам контроля параметров при проведении реостатных испытаний / А.К. Белоглазов и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 2 – 8.
7. Тарута В.Ф. Технология контроля уровня мощности для настройки дизель-генераторной установки маневрового тепловоза с учетом условий эксплуатации / В.Ф. Тарута, А.В. Чулков, Л.В. Милютин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 1 (33). – С. 109 – 117.
8. Данковцев В.Т. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов / В.Т. Данковцев, В.И. Киселев, В.А. Четвергов / УМЦ ЖДТ. – М., 2007. – 557 с.
9. Носков В.І. Контроль і діагностика стану тягового електропривода / В.І. Носков, М.В. Мезенцев, С.Ю. Гавриленко, Г.В. Гейко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». – вип. 1 (63). – 2021. – С. 58 – 61.
10. Носков В.І. Метод определения гармонического состава фазного тока статора асинхронного двигателя в системах регулируемых приводов / В.І. Носков, Н.В. Мезенцев, Г.В. Гейко, М.В. Липчанский // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Харків: ХУПС, 2015. – № 7 (132). – С. 59 – 61.

Received (Надійшла) 26.05.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.08.2021

### Checking and adjusting parameters of traction electric drive in stationary modes

Valentin Noskov, Vasyl Blyndiuk, Volodymyr Skorodielov, Hennadii Heiko

**Abstract.** When developing the power transmission of the domestic diesel train DEL-02 with traction asynchronous motors, the question of the possibility of checking its main characteristics in the conditions of the depot was decided. To do this, it was necessary to provide in stationary load condition and control of the operation of the diesel generator set, frequency converter and traction motors without the use of additional equipment. To ensure the reliability of the operational characteristics of the diesel train, a system for monitoring and diagnosing the main parameters in the process of movement has been introduced into the power transmission control system. In addition, taking into account the peculiarities of the power transmission, it is possible to check and adjust its parameters in stationary modes. For this purpose, it has been proposed and justified to use a braking resistor as a load of a diesel generator, while the frequency converter is loaded onto the braked traction motors. In this case, the control system remains closed, and the registration of parameters is performed by the monitoring and diagnostic system.

**Keywords:** traction asynchronous motor, diesel train, monitoring and diagnostic system, braking resistor.

М. А. Павленко, Д. О. Каліновський

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА УПРАВЛІННЯ ЧАСТИНАМИ ЗЕНІТНИХ РАКЕТНИХ ВІЙСЬК ТА ТАКТИЧНОЇ АВІАЦІЇ

**Анотація.** У статті проводиться аналіз методів та моделей прийняття рішення в процесі управління частинами зенітних ракетних військ та тактичної авіації під час розподілу зусиль для знищення повітряного противника. Метою роботи є визначення ступеня впливу математичних апаратів методів математичного моделювання та їх інтеграцій, на формування альтернатив комплексу засобів автоматизації. Методологія проведеного дослідження включає емпіричний, теоретичний та загально логічні методи. Під час проведення дослідження виявлено властивість методів нечіткої логіки з підвищенням рівня складності моделі, а з нею і кількості правил, покращується її можливість описувати реальні умови що дозволяє вирішувати завдання, коли традиційні методи неефективні, а саме відповідність вимогам які висувуються щодо обґрунтованості прийняття рішення та можливості отримання пояснення. Використовуючи класичну технологію прийняття рішення з відповідними методами і моделями можна прослідкувати їх взаємозв'язок на кожному з етапів. Тобто, за допомогою перехресної перевірки методів та моделей одна одною, так як в кожній з них є переваги і недоліки. Використання вихідних даних одного методу як вхідних в наступному етапі і з іншим методом дає змогу не тільки перевірити вхідні дані а й збільшити кількість альтернатив. З іншої сторони взаємозв'язок можливо трактувати як наближений із за множини послідовностей використання методів і моделей на різних рівнях. Тобто в залежності від вибраної послідовності реалізації методів і моделей на кожному з етапів, можливо отримати різні множини значень. Практично підхід щодо виробки альтернатив прийняття рішення для розподілу зусиль між зенітними ракетними військами та тактичною авіацією може бути реалізований в комплексі засобів автоматизації за рахунок впровадження методів та моделей системи підтримки прийняття рішення.

**Ключові слова:** прийняття рішення, метод аналізу ієрархій, нечіткі множини, нечітка логіка.

### Вступ

Для вирішення задач пов'язаних з організацією та управлінням частинами зенітних ракетних військ та тактичної авіації, які виникають в процесі, спільної підготовки і застосування, виникає потреба в прийнятті управлінських рішень. Кожне таке рішення носить синергетичний характер, який без врахування попереднього досвіду може призвести до різних і не завжди позитивних наслідків (ризиків [1, 2]).

**Постановка проблеми.** Під час прийняття управлінського рішення на розподіл зусиль щодо знищення повітряного противника між зенітними ракетними військами та винищувальною авіацією, перед особою яка приймає рішення (ОПР) постає необхідність в розв'язку багатокритеріальної задачі з використанням комплексу засобів автоматизації (КЗА). Тобто ОПР повинна вибрати таку альтернативу з множини сформованих КЗА, яка б задовільнила досягнення цілі і мети визначеного завдання. Для забезпечення адекватного функціонування альтернатив при розподілі інтелектуального ресурсу визначити достатній обсяг вхідної інформації з заданою достовірністю з врахуванням допустимих часових термінів, які необхідні для її формалізації та використання. Створити умови які б дозволяли використовувати весь набір знань з логічним поясненням в залежності від поточної обстановки в реальному масштабі часу та у відповідності до заданого рівня ефективності. Тому з метою визначення ступеню впливу кожного із методів рішення завдання, виникає необхідність розглянути теоретичне і практичне значення кожного з них.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Прийняття рішень в ході спільного застосування зенітних ракетних військ та винищувальної авіації здійснюється в різних умовах з використанням множини параметрів, що потребує використання багатокритеріальних методів з автоматизацією процесу виробки рішення. Серед них, широке використання набули використання узагальнених критеріїв [3] з ваговими коефіцієнтами їх важливості [4], метод аналізу ієрархій (МАІ) [5, 6], який оснований на попарному порівнянні альтернатив, теорії ігор [7], нечітких множин та нечіткої логіки [8, 9]. Проте необхідно визначити переваги їх використання саме під час прийняття рішення в процесі розподілу зусиль, щодо знищення повітряного противника зенітними ракетними військами та винищувальною авіацією.

**Мета статті** – полягає в дослідженні ступеня впливу математичних апаратів методів математичного моделювання та їх інтеграцій, на формування альтернатив КЗА.

### Виклад основного матеріалу

Вироблення рішень під час підготовки та застосування військ (сил) супроводжується впливом різномірних факторів, які діють на кожному з етапів формування рішення. Разом з тим необхідно враховувати зміни параметрів, які відбуваються в залежності від цих факторів. Тобто скільки часу фактор діє на параметр а відповідно і на етап і до яких наслідків призводить. Для висвітлення підходу щодо виявлення ступеню взаємозв'язку методів і моделей, які використовуються під час прийняття рішення на управління військовими частинами на кожному з етапів обрано класичну технологію прийняття рішення на основі трьох етапів:

- постановка завдання (діагностика проблеми);
- вироблення варіантів альтернатив;
- відбір та реалізація оптимального рішення (з погляду на відповідний критерій).

Зазначимо, що є більш деталізовані моделі етапів прийняття рішення, які згадуються в роботах [10], проте формування загальної картини на основі цих моделей потребує визначення додаткових аспектів, які не будуть відображені в даній публікації.

I етап (постановка задачі) характерний формулюванням цілей або їх сукупністю, які є складовими

елементами мети або самою метою. Він складається з таких кроків як: описання проблеми, збору інформації (факторів, які зумовили проблему) та аналіз інформації.

Формалізована модель застосування моделей та методів етапу “Постановка завдання” зображена на (рис. 1).

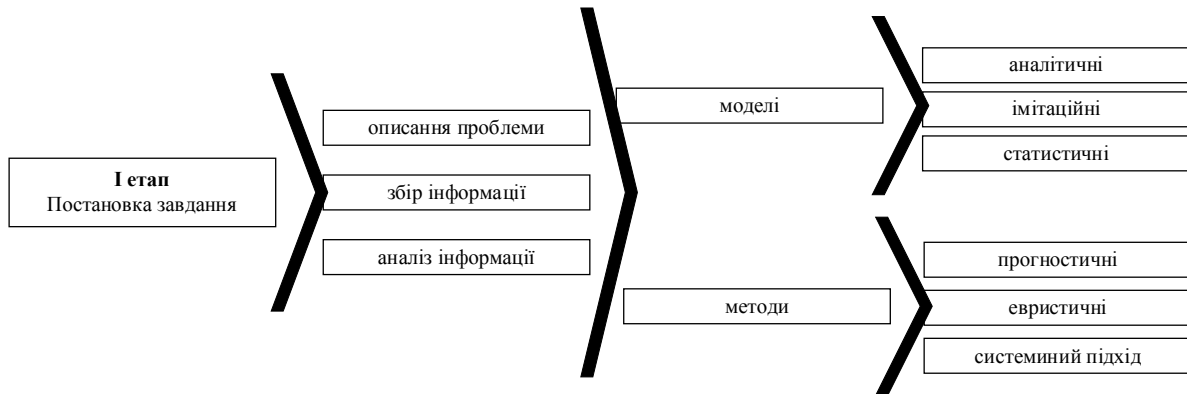


Рис. 1. Формалізована модель застосування моделей та методів етапу “Постановка завдання”

II етап (розробка альтернативних рішень) характеризується формалізацією знань у відповідності до інформаційного потоку з встановленням взаємозв'язків між отриманою інформацією і сформованими знаннями для автоматизації процесу вироблення рішення. Тобто, відбувається узагальнення отриманої інформації у відповідності до методології, яка реалізована в системі підтримки прийняття рішення з метою формування альтернатив на основі яких особа, яка приймає рішення зробить висновок і прийме рішення.

Складовими другого етапу “Вироблення варіантів альтернатив” є: обробка інформації, встановлення взаємозв'язків та формування альтернатив. Моделі які використовуються на даному етапі схожі з першим етапом, проте не враховуються моделі які використовуються для обробки даних, що значно розширить загальну картину процесу прийняття рішення тим самим збільшивши кількість зв'язків які необхідно дослідити. Формалізована модель етапу “Вироблення варіантів альтернатив” зображена на (рис. 2)

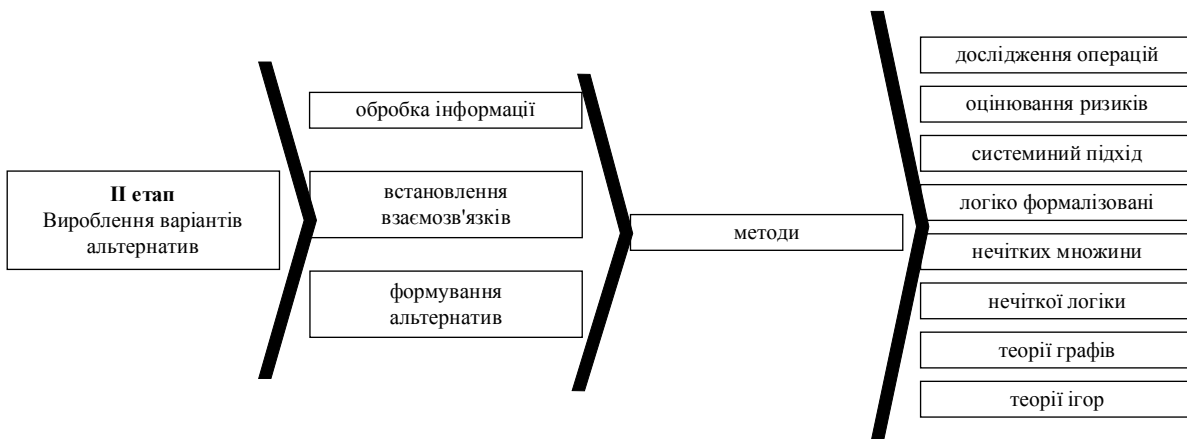


Рис. 2. Формалізована модель етапу “Вироблення варіантів альтернатив”

III етап (відбір та реалізація оптимального рішення) складається за таких кроків як: формування критеріїв, оцінка альтернатив, оцінка ефективності та прийняття рішення. Моделі і методи будуть схожі з 2 етапом, тоді можна сказати що в залежності від вибраного методу і використання її на кожному етапі модель яка буде описувати весь процес прийняття рішення (включаючи організацію, оцінку прийняття рішення і наслідків його реалізації) буде будуватись ієрархічно, використовуючи результати попередніх розрахунків.

Переваги використання методів при виробленні рішення визначаються такими вимогами [9, 11]:

- можливості врахування показників ефективності виконання завдання;
- оперативності вироблення рішень;
- можливість врахування бойових можливостей та специфіки застосування;
- обґрунтованість прийняття рішення;
- можливості отримання пояснень;
- можливість врахування наслідків і ризиків.

Для визначення ступеню відповідності вимогам запропоновано розглянути основні аспекти методів, які використовуються в процесі прийняття рішення. Використовуючи наведений процес прийняття рі-

шення підкреслимо, що складова формування критеріїв одночасно залежить від ряду факторів різного характеру. Тобто при дослідженні ми отримуємо значення різних параметрів з своїми критеріями (частковими критеріями). Об'єднавши часткові критерії в загальний критерій ми нівелюємо недостачу ефективності одного показника за допомогою компенсації з іншими. Тому виникає парадокс в цінності критерія. Коли велика цінність критерію не відповідає його значущості [3]. В нашому випадку при оцінці бойових можливостей ми можемо компенсувати час підготовки до виконання завдання часом виходу на рубіж пуску. З іншої сторони можна побудувати систему зважених критеріїв у відповідності до існуючих методів з метою зменшення похибки розрахунків та/або виконати багатокритеріальну оптимізацію.

МАІ в порівнянні з використанням узагальненого критерію можливо використати в складних умовах (невизначеній динамічній обстановці) використовуючи ієрархічну структуру розбитої на елементи системи з використанням суб'єктивних і об'єктивних оцінок експертів. Тому одним з етапів

проведення розрахунків слід оцінити достовірність оцінок експертів і провести узгодження [10]. Цей метод можемо застосувати для:

- визначення альтернатив;
- визначення часткових критеріїв та формування узагальненого;
- визначення оперативності та обґрунтованості процесу прийняття рішення;
- групування великої кількості параметрів (характеристик в кластери);
- інтерпретувати пріоритети за допомогою теорії графів.

Ієрархічне зображення приведе на основі рішення задачі ефективності бойового застосування винищувальної авіації. Де перший рівень являється метою, другий рівень узагальненні показники, третій рівень часткові показники. Кожен узагальнений показник в свою чергу має свою групу часткових показників, проте кожен частковий показник може також входити і до інших груп. Рішення такої задачі являється одним з елементів системи підтримки прийняття рішення (рис. 3).

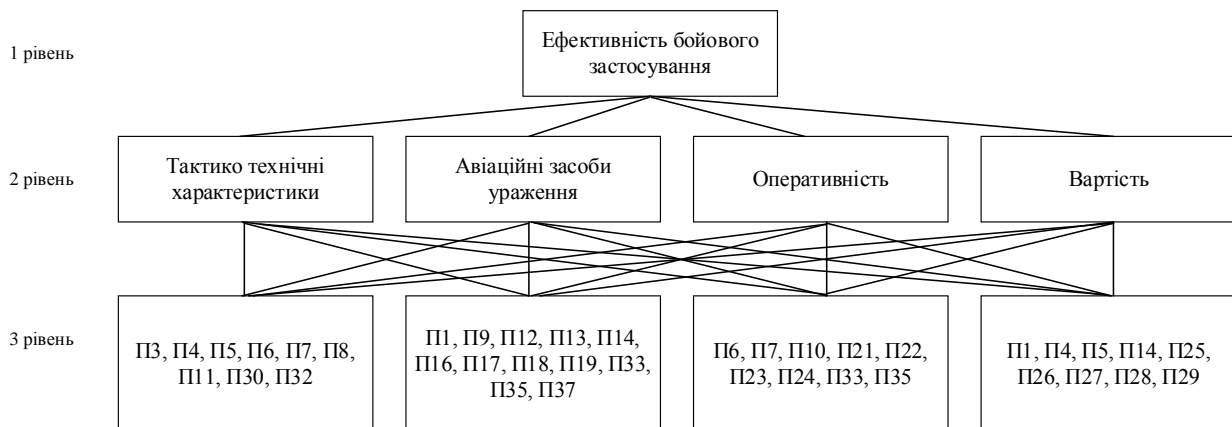


Рис. 3. Ієрархічне зображення задачі визначення ефективності бойового застосування

Тобто приведений метод дозволяє не тільки враховувати фактори які впливають на прийняття рішення, шляхом попарного порівняння, а й порівнювати альтернативи в залежності від своїх зв'язків, груп і рівня [11]. Проте даний метод не дає пояснень, що зумовлено присвоєнням вагових коефіцієнтів на основі особистої думки експертів, їхнього суб'єктивного бачення важливості.

Попередні методи передбачають прийняття рішення однією особою, яка несе за нього відповідальність. В теорії ігор на результат ігри впливають рішення декілька учасників, інтереси яких можуть бути різні. Кожен хід - це прийняття рішення, а їх сукупність це стратегія [12], яка реалізується для досягнення цілі. Прикладом може бути проведення двосторонньої гри з визначеними правилами, які визначають множину стратегій учасників а з іншої сторони наслідки і перемогу в результаті вибору кожної з стратегій. Проте створення оптимальної стратегії вимагає високих інтелектуальних і аналітичних здібностей а її реалізація може рухнути при виникненні неврахованого фактору чи події на одному з кроків. Проте розгляд ієрархічної ігри [13]

дозволяє розглянути послідовність ходів на основі яких можна побудувати ігрову модель з фіксованим порядком якого будуть дотримуватись обидві сторони при прийнятті рішень.

Використання нечітких множин, нечіткої логіки та нечіткого моделювання дозволяє вирішувати завдання, коли традиційні методи неефективні. Оперативність та обґрунтованість прийнятих рішень вимагає поєднання кількості та якості інформації починаючи з умов обстановки і завершуючи специфікою застосування визначених сил та засобів, які використовуються. Використовуючи попередні методи ми не можемо в повній мірі оцінити повноту та достовірність вхідної інформації. Тобто ще не провівши дослідження ми вже упустили показники критерія оцінки обґрунтованості прийнятих рішень [14]. Тоді навіть при експертній оцінці визначеної інформації виникає потреба в повторній оцінці при збільшенні чи зменшенні кількості факторів. Проте попередні методи мають місце в нечітких моделях, коли результати проведених розрахунків є частковим результатом діапазону прийняття визначеного рішення. Для прикладу стратегія max/min, яка використовується в теорії ігор має

свою реалізацію в нечіткому виводі [15]. Проте використовуючи методи нечіткої логіки з підвищенням рівня складності моделі а з нею і числа правил або нечітких множин покращується її можливість описувати реальні умови. Це дає нам змогу в залежності від діапазону рішень їх ієрархії і наслідкових зв'язків виділити властивість рефлексивності прийняття рішення з визначеним ступенем достовірності.

### Висновки

Використовуючи класичну технологію прийняття рішення з відповідними методами і моделями можна про-слідкувати їх взаємозв'язок на кожному з етапів. Тобто, за допомогою перехресної перевірки методів та моделей одна одною, так як в кожній з них

є переваги і недоліки. Використання вихідних даних одного методу як вхідних в наступному етапі і з іншим методом дає змогу не тільки перевірити вхідні дані а й збільшити кількість альтернатив. З іншої сторони взаємозв'язок можливо трактувати як наближений із за множини послідовностей використання методів і моделей на різних рівнях. Тобто в залежності від вибраної послідовності реалізації методів і моделей на кожному з етапів, можливо отримати різні множини значень. Практично підхід щодо виробки альтернатив прийняття рішення для розподілу зусиль між зенітними ракетними військами та тактичною авіацією може бути реалізований в комплексі засобів автоматизації за рахунок впровадження методів та моделей системи підтримки прийняття рішення.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Посохов І. М. Управління ризиками у підприємстві: навчальний посібник \ І. М. Посохов. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – 220 с
2. Гонтарева І. В. Управління проектами. Підручник / І. В. Гонтарева. – Харків: Вид. ХНЕУ, 2011. – 444с
3. Лотов А. В. Многокритериальные задачи принятия решений / А. В. Лотов, И.И. Поспелова. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 198 с.
4. Ткаченко В. І. Теорія прийняття рішень органами військового управління: монографія / В. І. Ткаченко, Є. Б. Смірнов та ін. // За ред. В. І. Ткаченка, Є. Б. Смірнова. – Х.: ХУПС, 2008. – 545 с.
5. Творошенко І.С. Технології прийняття рішень в інформаційних системах: навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 120 с.
6. Раскин М. А. «Введение в теорию игр» // Летняя школа «Современная математика». – Дубна: 2008.
7. Соколовська З. М. Математичне та комп'ютерне моделювання економічних процесів:[монографія ] / З. М. Соколовська, В. М. Андрієнко, І. Ю. Івченко [та ін.] – Одеса: Астропринт, 2016. – 272 с.
8. Taskin, Ahmet and Kumbasar, Tufan (2015), “ An Open Source Matlab/Simulink Toolbox for Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems”, 2015 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, pp. 1561-1568
9. Mendel J. M. Uncertain Rule-Based FuzzySystems / J. M. Mendel. — L. A.: University of Southern California, 2017. — 684 с.
10. Митрахович М. М. Беспилотные авиационные комплексы: Методика сравнительной оценки боевых возможностей / М. М. Митрахович, В. И. Силков, А.В. Самков, Х.В. Бурштынская, С.А. Станкевич, В.Б. Семенов. Под общей редакцией В.И. Силкова. - К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2012. - 288 с.; 102 рис; 73 табл.
11. Загорка О.М. Багатокритеріальні методи прийняття рішень органами військового управління Анатолій Казимирович Павліковський (канд. військ. наук, доцент)Ірина Олексіївна Загорка Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна
12. Мулен Э. Теория игр с примерами из математической экономики. - М.: Мир, 1985
13. Губко М.В., Новиков Д.А. Теория игр в управлении организационными системами. Издание 2, М.: 2005.
14. Смірнов Є. Б. Теоретичні основи формування та деградації складних організаційно-технічних систем : монографія / Є. Б. Смірнов, В.І. Ткаченко, І. В. Рубан, В.Г. Малюга, А.В. Тристан. - Харків : ФОП Панов А.М., 2008. - 162 с.
15. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат; пер. с англ.2е изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 798 с.: ил. (Адаптивные и интеллектуальные системы).

Received (Надійшла) 23.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.08.2021

### Analysis of methods and models of decision-making for managing of air defense missile troops and tactical aviation

Maksim Pavlenko, Dmytro Kalinovskyi

**Abstract.** The article analyzes the methods and models of decision-making in the management of anti-aircraft missile forces and tactical aircraft during the distribution of efforts to destroy the enemy air. The aim of the work is to determine the degree of influence of mathematical devices of methods of mathematical modeling and their integrations on the formation of alternatives to the complex of automation tools. The methodology of the study includes empirical, theoretical and general logical methods. The study revealed the properties of fuzzy logic methods with increasing complexity of the model, and with it the number of rules, improves its ability to describe real conditions, which allows to solve problems when traditional methods are ineffective, namely compliance with the requirements for decision-making and feasibility getting an explanation. Using classical decision-making technology with appropriate methods and models, you can trace their relationship at each stage. That is, by cross-checking methods and models with each other, as each of them has advantages and disadvantages. Using the output of one method as input in the next step and with another method allows not only to check the input but also to increase the number of alternatives. On the other hand, the relationship can be interpreted as approximate from a set of sequences of methods and models at different levels. That is, depending on the selected sequence of implementation of methods and models at each stage, it is possible to obtain different sets of values. In practice, the approach to developing decision-making alternatives for the distribution of efforts between anti-aircraft missile forces and tactical aircraft can be implemented in a set of automation tools through the introduction of methods and models of decision support systems.

**Keywords:** decision making, hierarchy analysis method, fuzzy sets, fuzzy logic.

П. І. Бідюк<sup>1</sup>, Є. В. Гуць<sup>1</sup>, В. В. Гавриленко<sup>2</sup>, Н. В. Рудоман<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет України "КПІ ім. Ігоря Сікорського", Київ, Україна

<sup>2</sup> Національний транспортний університет, Київ, Україна

## ПРОГНОЗУВАННЯ ЦІН АКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕКУРЕНТНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ LSTM

**Анотація.** Дослідження проведено для ознайомлення зі структурою та принципом роботи рекурентної нейронної мережі LSTM (Long short-term memory) та аналізу можливості її використання для прогнозування цін акцій однієї з великих технологічних компаній. В роботі описано теоретичний матеріал, що стосується рекурентних нейронних мереж та мережі LSTM. На прикладі статистичних даних акцій компанії Apple було продемонстровано роботу обраного методу та обчислено оцінки якості прогнозу RMSE, MAE, MAPE і оцінено точність короткострокового прогнозу. Результати дослідження показали, що рекурентні нейронні мережі можна застосовувати для прогнозування часових рядів і при цьому отримувати результат з високою точністю. У подальших дослідженнях будуть запропоновані інші види нейронних мереж та оцінка їх роботи на фінансових даних.

**Ключові слова:** прогнозування цін, рекурентна нейронна мережа, LSTM, оцінка якості прогнозу, точність короткострокового прогнозу, прогнозування часових рядів.

### Вступ

Сьогодні ми спостерігаємо накопичення великих обсягів інформації, які потребують відповідної обробки для прийняття певних рішень. Проблеми математичного моделювання стають все більше актуальними для ефективної організації управління певними суб'єктами господарювання та економічними спільнотами через те, що якість прийнятих рішень значною мірою залежить від якості прогнозування їх наслідків. Саме тому рішення, прийняті сьогодні, повинні ґрунтуватися на достовірних оцінках можливого розвитку процесів та подій в майбутньому [1].

У період технічного прогресу спостерігається ріст впливу великих корпорацій, які впевнено займають лідируючі місця на світовому ринку та мають мільярдні прибутки. Ціноутворення акцій світових гігантів є дуже цікавим для вивчення процесом, який, як правило, є нестационарним, оскільки містить тренд та змінну у часі дисперсію.

Американський сервіс «Yahoo! Finance» надає досить детальні дані по темам, пов'язаним з бізнесом, фінансами та економікою.

Довідкова інформація включає в себе котирування і рейтинги цінних паперів, прес-релізи та фінансові звіти компаній [2].

Для пошуку закономірностей в масивах даних використовуються методи інтелектуального аналізу даних. Сьогодні для побудови моделі широко використовуються нейронні мережі.

Цікавим підвидом є рекурентні нейронні мережі, які містять зворотні зв'язки та можуть зберігати інформацію. Ця властивість дає змогу прогнозувати інформацію, спираючись на контекст, що дало змогу ефективно вирішувати цілий ряд задач: розпізнавання мовлення, моделювання голосу, переклад, розпізнавання зображень, прогнозування часових рядів та інші.

Дане дослідження присвячене побудові і навчанню нейронної мережі LSTM та аналізу її використання для прогнозування цін акцій однієї з великих технологічних компаній.

**Постановка задачі.** У дослідженні ставляться такі задачі: – аналіз теоретичного матеріалу щодо функціонування рекурентних нейронних мереж; – розроблення структури мережі на мові Python; – демонстрація функціонування нейронної мережі на вибірці фінансових даних; – оцінювання якості прогнозу та аналіз отриманих результатів.

**Аналіз літератури.** Задачі прогнозування є надзвичайно популярними у самих різноманітних галузях діяльності, включаючи бізнес, економіку, фінанси, кліматологію, управління технологічними системами, технічними об'єктами і т. ін. Серед сучасних досліджень, спрямованих на високоякісне розв'язання задач моделювання і прогнозування необхідно вказати на [3–5]. У цих роботах розв'язуються задачі моделювання і короткострокового прогнозування процесів різної природи на основі регресійного та байєсівського підходів до аналізу даних. При цьому увага концентрується на стаціонарних та нестационарних фінансових та економічних процесах з детермінованими трендами, які з достатньою точністю можна описати детермінованими функціями, наприклад, поліномами, експонентами, гармонічними функціями і т. ін. Також пропонуються алгоритми моделювання і прогнозування вибраних процесів із застосуванням адаптації. Аналіз вказаних та багатьох інших літературних джерел свідчить, що сьогодні існує запит на нові підходи до математичного моделювання і високоякісного прогнозування різноманітних процесів. Тому створення адекватних моделей та оцінювання прогнозів на їх основі, особливо для складних нелінійних нестационарних процесів є високо актуальною задачею.

**Невирішені питання.** Основними завданнями сучасних підходів до моделювання і прогнозування



процесів різної природи є побудова адекватних моделей складних за структурою нелінійних нестационарних процесів, які забезпечать отримання високоякісних оцінок прогнозів. При цьому необхідно забезпечити врахування можливих невизначеностей даних і структури моделі з метою підвищення якості проміжних та остаточних результатів обчислень.

**Мета статті.** Метою дослідження є аналіз можливості застосування рекурентних нейронних мереж до моделювання і короткострокового прогнозування нелінійних нестационарних фінансових процесів. Для розв'язання задачі будуть використані рекурентні мережі які містять зворотні зв'язки та можуть зберігати інформацію.

**Виклад основного матеріалу**

**Рекурентні нейронні мережі та мережа LSTM.**

Людський мозок працює так, що людина думає послідовно, тобто не починає думати кожний наступний момент спочатку. Читаючи будь-який текст, ми розуміємо зміст та значення кожного слова, відштовхуючись від контексту. Традиційні нейронні мережі не володіють цією властивістю і це їх головний недолік. Уявимо, наприклад, що нам стоїть задача класифікувати події, що відбуваються у фільмі. Незрозуміло, чи могла б зробити це звичайна мережа, не беручи до уваги попередні події у фільмі.

Для вирішення розглянутої проблеми були придумані рекурентні нейронні мережі (Recurrent Neural Networks, RNN), які містять зворотні зв'язки та можуть зберігати інформацію. На рис.1 показано схематична будова таких мереж. Фрагмент А отримує на вхід  $X_t$  і повертає  $h_t$ . Наявність оберненого зв'язку дає змогу передавати інформацію від одного шару мережі до іншого [6–8].

Для кращого розуміння рекурентну нейронну мережу можна зобразити у розгорнутому, більш звичному вигляді, що не містить циклів (рис. 2). у даному поданні елементи є копією однієї і тієї ж самої мережі, кожна з яких передає інформацію наступній копії.

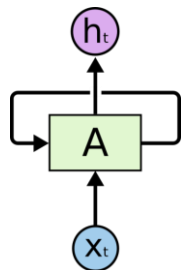


Рис. 1. Рекурентна нейронна мережа

Останні кілька років РНМ користуються великим попитом для вирішення цілого ряду задач: розпізнавання мовлення, моделювання голосу, переклад, розпізнавання зображень, прогнозування часових рядів та інші.

В більшості випадків використовуються модифіковані мережі, як, наприклад, LSTM (Long short-term memory). Про них більш детально описано далі в роботі.

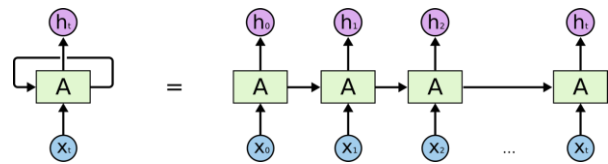


Рис. 2. Рекурентна нейронна мережа в розгорнутому вигляді

Незважаючи на всі переваги РНМ, існує кілька проблем, пов'язаних з їх використанням. Іноді для виконання задачі нам потрібно тільки недавня інформація. Розглянемо, наприклад, мережу, яка прогнозує наступне слово на основі попередніх. У випадку, коли прогнозоване слово очевидне і явно впливає із контексту, відстань між актуальною інформацією і місцем, де вона знадобилась, невелика (рис. 3), тому можна з легкістю навчити РНМ, використовуючи інформацію із минулого.

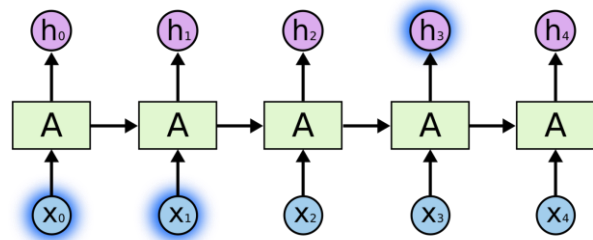


Рис. 3. РНМ з невеликою відстанню між вузлами

Але можуть виникнути випадки, коли нам потрібно більше контексту. Допустимо, нам потрібно передбачити останнє слово у тексті «Я живу в Україні. Я впевнено розмовляю українською». Найближчі слова підказують, що останнім словом буде мова, але щоб визначити яка, нам потрібно дістатись слова «Україні» із більш далекого минулого. Таким чином, різниця між активною інформацією і точкою її застосування може стати дуже великою (рис. 4). В результаті, з мірою росту розмірів мережі втрачається властивість зв'язувати інформацію.

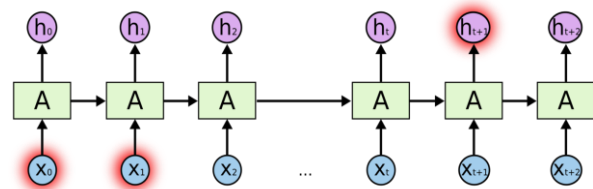


Рис. 4. РНМ з великою відстанню між вузлами

Теоретично, такої проблеми виникати не повинно. Людина може обережно підбирати параметри мережі для розв'язування задачі такого типу. На практиці виявилось, що навчити РНМ таким параметрам неможливо. Це питання досліджували Зеп Хохрайтер (1991) та Іошуа Бенджіо (1994). Вони знайшли доведення того, що це зробити вкрай важко.

Long short-term memory (Довга короткострокова пам'ять), скорочено LSTM – підвид рекурентних нейронних мереж, у якому реалізовано можливість навчання довгострокових зв'язків.

Будь-яка рекурентна нейронна мережа має вигляд ланцюга модулів нейронної мережі, що повторюються. У звичайній РНМ модуль має просту будову і складається, наприклад, з одного шару із функцією активації tanh (рис. 5).

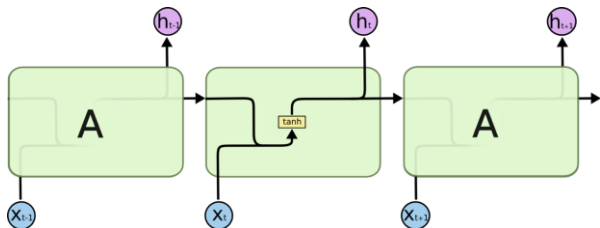


Рис. 5. Ланцюг звичайної РНМ, що складається із одного шару

Структура LSTM також є ланцюгом, але модулі мають більш складну структуру. Замість одного шару, як у звичайній РНМ, модуль LSTM містить чотири шари, які взаємодіють між собою (рис. 6).

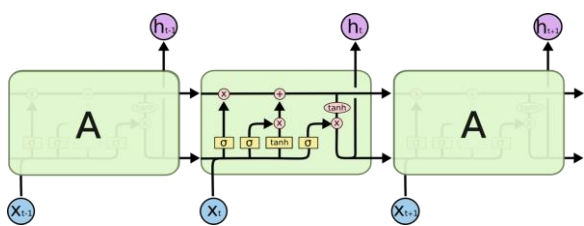


Рис. 6. Ланцюг LSTM, що складається із чотирьох шарів

Основним компонентом LSTM є стан комірки (cell state) – горизонтальна лінія у верхній частині схеми (рис. 7). Вона проходить через всю комірку і бере участь лише у деяких лінійних перетвореннях. Інформація також може не зазнавати жодних перетворень, проходячи через неї.

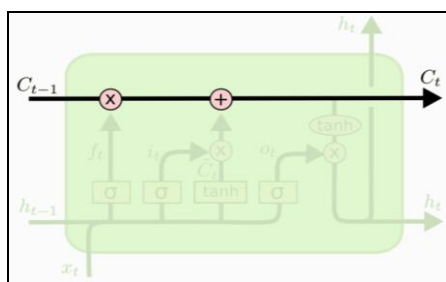


Рис. 7. Стан комірки

Проте LSTM може видаляти інформацію із стану комірки, цей процес регулюється фільтрами (gates) (рис. 8). Фільтри дозволяють пропускати інформацію на підставі деяких умов. Вони складаються з шару сигмоїдальної нейронної мережі і операції поелементного множення.

Сигмоїдальний шар повертає числа від нуля до одиниці, які позначають, яку частку кожного блоку інформації слід пропустити далі по мережі. Нуль в даному випадку означає "не пропускати нічого", одиниця – "пропустити все". У LSTM існують три таких фільтра, що дозволяють захищати і контролювати стан комірки.

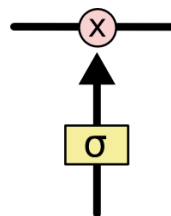


Рис. 8. Фільтр РНМ

Першим кроком роботи мережі слід визначити, яка інформація у стані комірки є непотрібною і її можна викинути. Це рішення приймає сигмоїдальний шар, що називається «шаром фільтра забування» (англ. forget gate level). Його функція полягає в тому, щоб приймати на вхід  $h_{t-1}$  та  $x_t$  і повертати значення від 0 до 1 для кожного числа із стану комірки  $C_{t-1}$ , де 1 означає «повністю зберегти», а 0 – «повністю забути» (рис. 9).

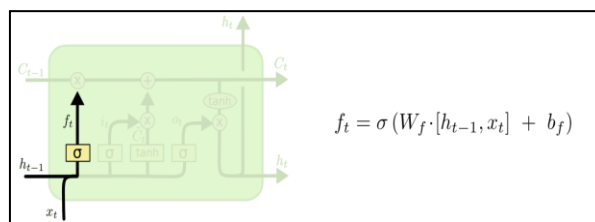


Рис. 9. Фільтр забування

Наступним кроком слід вирішити яка нова інформація буде зберігатись. Даний етап складається із двох частин. Спочатку шар під назвою «шар вхідного фільтра» (англ. input layer gate) визначає які значення слід оновити. Після чого шар tanh буде вектор значень нових кандидатів які додадуться в стан комірки (рис.10).

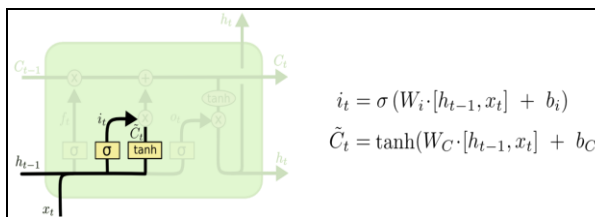


Рис. 10. Шари вхідного фільтра та tanh

Після цього потрібно замінити старе значення стану комірки на нове. Для цього слід помножити старе значення на  $f_t$ , щоб забути те, що ми викинули, і додати значення нового кандидата (рис. 10) – це кандидати на нові значення, помножені на число, що показує, наскільки ми хочемо оновити кожне із значень стану (рис. 11).

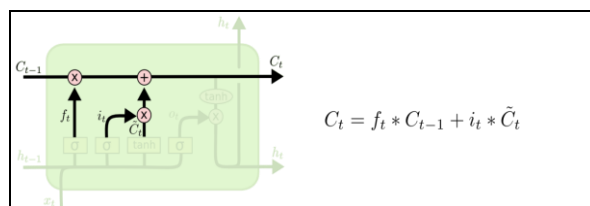


Рис. 11. Крок заміни старого значення комірки на нове

Останнім кроком потрібно вирішити, яку інформацію передати на вихід. Вихідні дані базуються на нашому стані комірки із застосуванням деяких фільтрів. Сигмоїдальний шар вирішує яку інформацію із стану комірки ми будемо виводити. Потім значення стану комірки переходять через шар  $\tanh$ , щоб отримати на виході значення в діапазоні від -1 до 1, і перемножуються з вихідними значеннями сигмоїдального шару, що дає змогу виводити лише потрібну інформацію (рис. 12).

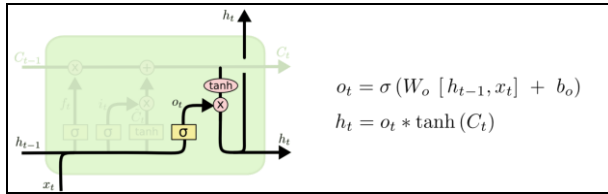


Рис. 12. Формування вихідного значення мережі

**Приклад застосування мережі LSTM на фінансових даних.** У цьому дослідженні будуть прогнозуватись дані закриття торгів компанії Apple. Обраний датасет містить дані торгів за останні 5 років. Вигляд знайдених даних подано на рис. 13.

Основні статистичні характеристики колонки «Close» подано у табл. 1.

Створимо і навчимо рекурентну нейронну мережу LSTM і перевіримо її роботу на даних закриття акцій компанії. Створена мережа складається з 4 шарів (рис. 14), використовує оптимізатор Adam та середньоквадратичну помилку, як функцію втрат.

Обраний датасет розділено на 2 частини, з яких 80% тренувальна вибірка, 20% – валідаційна. Результати роботи нейронної мережі зображено на рис. 15, де спочатку графіка позначено тренувальну вибірку, надалі – валідаційну, та наприкінці позначені спрогнозовані значення.

Date	High	Low	Open	Close	Volume	Adj Close
2015-12-07	29.965000	29.452499	29.745001	29.570000	128336800.0	27.173285
2015-12-08	29.650000	29.215000	29.379999	29.557501	137238000.0	27.161795
2015-12-09	29.422501	28.770000	29.410000	28.905001	185445600.0	26.562178
2015-12-10	29.235001	28.877501	29.010000	29.042500	116850800.0	26.688534
2015-12-11	28.847500	28.212500	28.797501	28.295000	187544800.0	26.001623
...	...	...	...	...	...	...
2020-12-01	123.470001	120.010002	121.010002	122.720001	128166800.0	122.720001
2020-12-02	123.370003	120.889999	122.019997	123.080002	89004200.0	123.080002
2020-12-03	123.779999	122.209999	123.519997	122.940002	78967600.0	122.940002
2020-12-04	122.860001	121.519997	122.599998	122.250000	78133200.0	122.250000
2020-12-07	124.570000	122.250000	122.309998	123.750000	78742725.0	123.750000

Рис. 13. Вигляд даних для компанії Apple

```

Model: "sequential"
Layer (type)                Output Shape                Param #
=====
lstm (LSTM)                  (None, 60, 50)             10400
lstm_1 (LSTM)                (None, 50)                  20200
dense (Dense)                (None, 25)                  1275
dense_1 (Dense)              (None, 1)                   26
=====
    
```

Рис. 14. Структура мережі



Рис. 15. Результати прогнозування на даних компанії Apple

Таблиця 1 – Статистичні характеристики колонки «Close»

Характеристика			
Максимум	Мінімум	Середнє	Медіана
133.948898	20.994093	48.579072	41.933216

Таблиця 2 – Оцінки якості прогнозу

Оцінка			Точність прогнозу, %
RMSE	MAE	MAPE	
3,916	2,838	3,173	96,827

**Аналіз отриманих результатів.** Із графіків видно, що мережа досить добре справляється із задачею прогнозування даних.

Значення, отримані шляхом прогнозування, є досить близькими до реальних. Але лише однієї візуальної оцінки недостатньо для виведення висновку щодо роботи моделі та порівняння з іншими моделями, для цього слід поррахувати оцінки якості моделі, такі, як RMSE, MAE, MAPE [6, 9] (табл. 2).

### Висновки

У роботі було розглянуто принцип роботи рекурентної нейронної мережі LSTM та перевірено її роботу на значній за обсягом тестовій вибірці. На

прикладі даних акцій компанії Apple було продемонстровано роботу обраного методу.

За результатами отриманого прогнозу обчислено оцінки RMSE, MAE, MAPE.

Отримали точність на рівні 96,8%, що є досить гарним показником.

Можна зробити висновок, що рекурентні нейронні мережі можна застосовувати для прогнозування часових рядів і при цьому отримувати результат з високою точністю.

В подальшому можна розглянути роботу і інших видів нейронних мережі для прогнозування фінансових рядів, а також порівняти їх роботу із звичними регресійними моделями.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бідюк П.І., Романенко В.Д., Тимошук О.Л. Аналіз часових рядів (навчальний посібник). – Київ: Політехніка, 2010. – 317 с.
2. Дані акцій компанії Apple на ресурсі Yahoo Finance. URL: <https://finance.yahoo.com/quote/AAPL>.
3. Robert C.R. Bayesian Choice. – New York: Springer, 2007. – 617 p.
4. Poop S-H. A Practical Guide to Forecasting Financial Market Volatility. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Ltd. 2005. – 238 p.
5. Tsay R.S. Analysis of Financial Time Series. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Ltd. 2010. – 715 p.
6. Klaus Greff, Rupesh Kumar Srivastava, Jan Koutnuk, Bas R. Steunebrink. LSTM: A Search Space Odyssey. 2015. 10 p.
7. Felix A. Gers, Jorgen Schmidhuber, Fred Cummins. Learning to Forget: Continual Prediction with LSTM. Neural Computation 12 (10), 2000. P. 2451–2471
8. Understanding LSTM Networks URL: <http://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/>.
9. Бідюк П.І., Половцев О.В. Аналіз та моделювання економічних процесів перехідного періоду. – Київ: НТУУ «КПІ», 1999. – 230 с.

Received (Надійшла) 30.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

### Forecasting stock prices using the recurrent neural network LSTM

P. Bidyuk, Y. Huts, V. Gavrilenko, N. Rudoman

**Abstract.** Modern financial processes exhibit complex nonlinear structure and non-stationary behavior over short and long time intervals. Such behavior can be explained by influence of multiple external stochastic disturbances and complicated nature of the price-forming processes at stock exchange. The traditional approach to modeling and forecasting behavior of such processes is based upon application of regression analysis and respective mathematical models. However, this approach to modeling is not always successful due to complicated structure of the time series under study and limited possibilities of the regression models to describe adequately nonlinear and non-stationary behavior of the processes selected for analysis. That is why it is more appropriate to use as alternative approach neural networks that exhibit very often superior characteristics of modeling and forecasting in comparison to regression models. This study was conducted to get familiar with the structure and principle of operation of the recurrent neural network LSTM (Long short-term memory) and analyze the possibility for its use to forecast the stock prices of one of the major world known technology companies. The theoretical material concerning recurrent neural networks and LSTM network was described in the paper in a volume providing the possibility for understanding basic principles of operation and practical application of the networks. Using as example the Apple stocks statistical data, the functioning of the chosen modeling method was demonstrated and the estimates of the quality of estimated forecasts such as RMSE, MAE, MAPE were calculated; and the accuracy of the forecast was estimated. The results of the simulation achieved showed that recurrent neural networks can be used to predict time series behavior and obtain the results with necessary high accuracy. Further research will suggest application of other types of neural networks, static and dynamic Bayesian networks, and evaluation of their performance on financial data exhibiting nonlinear and non-stationary behavior. Also it is planned to construct specialized decision support system based upon system analysis principles that would contain all necessary functions for further enhancement of modeling and forecasting results.

**Keywords:** forecasting stock prices, recurrent neural network, LSTM, assessment of forecast quality, accuracy of short-term forecast, time series forecasting.

Є. Ю. Вайвала, Н. В. Цьопа

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

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБІГОВИХ МОНЕТ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ЗГОРТКОВОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ З ДЕКІЛЬКОМА ВИХОДАМИ

**Анотація:** У роботі розглянуто проблему розпізнавання зображень обігових монет за допомогою згорткових нейронних мереж. Описано традиційний підхід до вирішення задачі розпізнавання зображень, який передбачає використання звичайної згорткової нейронної мережі з одним виходом, показано та проаналізовано отримані результати. Для підвищення точності розпізнавання було застосовано архітектуру згорткової нейронної мережі з декількома виходами. Отримані результати були порівняні із результатами роботи звичайної мережі, були наведені причини відмінностей у результатах та переваги і недоліки кожного із розглянутих підходів.

**Ключові слова:** згорткова нейронна мережа, нейронна мережа з декількома виходами, розпізнавання зображень, машинне навчання.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Навіть на сьогоднішній час, за умови стрімкого розвитку безготівкового розрахунку, випуск металевих монет як для звичайного користування, так і виключно для колекціонування не припиняється. Тому необхідність опізнати ту чи іншу монету може виникнути як у колекціонерів, так і у зацікавлених людей. Для початківців та інших малодосвідчених осіб така задача може стати суттєвою проблемою. У такому випадку найлегшим рішенням є розпізнавання монети за її зображеннями із допомогою програмних засобів, що нададуть користувачеві базову інформацію про монету за її зображеннями з двох боків.

Сьогодні найкращим підходом до розпізнавання зображень вважається використання згорткової нейронної мережі. У даній роботі представлено результати порівняння роботи традиційної загорткової нейронної мережі та згорткової нейронної мережі з декількома виходами для розпізнавання монет на прикладі датасету зображень, що містить фотографії сучасних обігових монет деяких країн Європи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Традиційний підхід до розпізнавання зображень полягає у використанні звичайної згорткової нейронної мережі, яка приймає на вхід певне зображення та повертає вектор чисел, що відображають впевненість нейронної мережі у відповідності зображення кожному

із заданих класів [1-6]. При такому підході кожне зображення у тренувальному датасеті визначається одним і лише одним класом, який повинен повною мірою охарактеризувати дане зображення і визначити відмінності від інших. Для розпізнавання обігових монет кожному зображенню монети ставиться у відповідність характеристика, що містить номінал, грошову одиницю та країну монети. Таким чином отримані класи виду «1 копійка, Україна» для кожного із зображень. Для країн Європи можна отримати декілька сотень таких класів, що при невеликій кількості зображень у датасеті призведе до досить малого обсягу зображень у кожному окремому класі.

Традиційна згорткова нейронна мережа (рис. 1) складається із послідовного чергування шарів згортки (convolutional layer) із функцією активації ReLU, які являють собою набір фільтрів, що після проходження по зображенню формують карти ознак для кожного фільтра, і агрегування (pooling), які виконують підвибірку і слугують для скорочення розміру представлення. На виході такої мережі розміщено один або декілька звичайних повноз'язних нейронних шарів для класифікації зображення [7].

Для більшості задач розпізнавання зображень звичним підходом є використання готової нейронної мережі, наприклад VGG16 або ResNet50, що була навчена на наборі зображень ImageNet, для переносу навчання з великого датасету на менший [8].

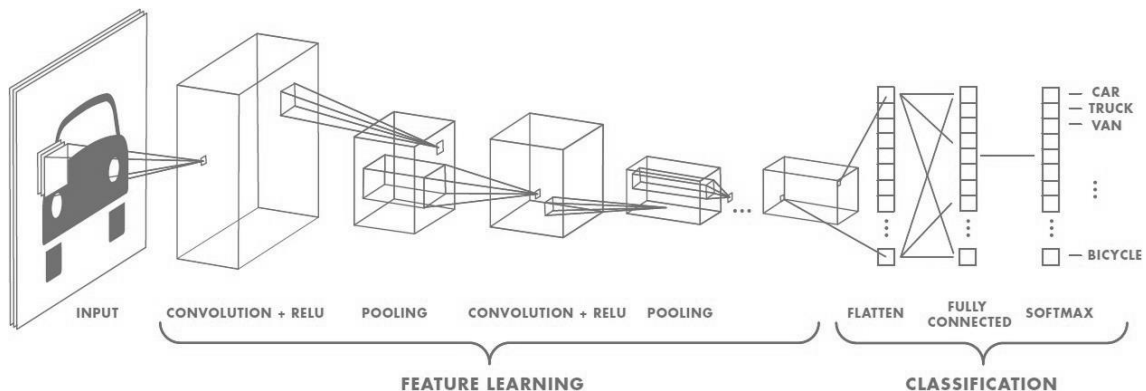


Рис. 1. Традиційна згорткова нейронна мережа

У даній роботі, з огляду на специфіку вхідних даних і обмеженість ресурсів для навчання нейронних мереж, використання таких мереж не виправдує себе і виникає необхідність у проектуванні власної нейронної мережі.

**Формулювання мети статті.** Мета даного дослідження полягає у побудові згорткової нейронної мережі для розпізнавання обігових монет країн Європи. Задля пошуку найкращого рішення розглянуто традиційний підхід до розпізнавання зображень та внесено зміни до моделі нейронної мережі з метою підвищення точності розпізнавання зображень з урахуванням особливостей вхідних даних.

Для якісного навчання будь-якої згорткової нейронної мережі необхідно забезпечити якомога більший тренувальний датасет розмічених зображень, тобто зображень, яким поставлені у відповідність певні класи.

Для переважної більшості задач розпізнавання зображень неважко знайти готові датасети на спеціалізованих сайтах у мережі Інтернет, проте для даного дослідження, за відсутності готового датасету, виникає необхідність власноруч розмітити зображення, що знаходяться у вільному доступі у мережі Інтернет та власні фотографії.

### Виклад основного матеріалу

Для даного дослідження було зібрано датасет, що містить більше ніж 40000 зображень монет, до нього увійшли сучасні обігові монети України, Польщі, Великобританії та країн Євросоюзу (Австрія, Андорра, Бельгія, Ватикан, Греція, Ірландія, Іспанія, Італія, Кіпр, Латвія, Литва, Люксембург, Мальта, Монако, Нідерланди, Німеччина, Португалія, Сан-Марино, Словаччина, Словенія, Фінляндія, Франція, Естонія), усього монети належать до 26 країн. Усі зображення були приведені до спільного вигляду і мають ширину 300 пікселів і висоту 150 пікселів, оскільки кожне з них містить два квадратних (150\*150 пікселів) зображення, на яких подано фотографії монети із двох сторін на білому або світло-сірому фоні.

Датасет було розділено на дві частини, 80% від загальної кількості становлять тренувальні дані, на яких мережа навчатиметься, а 20% – тестові, яких мережа «не бачила», та на яких перевірялася її робота. Під час навчання нейронної мережі тренувальні дані

було знову розділено на 80% виключно для тренування та 20% для валідації під час кожної епохи навчання, що дозволило швидко визначити перенавчання.

Через специфічні особливості вхідних даних, кількість тренувальних зображень для монет кожного класу суттєво залежить від часу, протягом якого вона випускалася та тиражів випуску. Як наслідок, найбільшим недоліком зібраного датасету є нерівномірність розподілення зображень за класами, наприклад, найменше усього зображень зібрано для монет невеликої Андорри, а найбільше – для монет Німеччини, які випускаються одразу на 5 монетних дворах дуже великими тиражами. Загалом, зображення були розподілені на 212 класів виду «номінал, грошова одиниця, країна». У датасеті наявні 8 грошових одиниць: копійка, гривня, грош, злотий, пенні, фунт, євроцент та євро і 8 номіналів: 0.500, 1, 2, 5, 10, 20, 25 та 50.

Також до датасету було включено як звичайні обігові монети, так і пам'ятні монети, що були випущені в обіг меншими тиражами, це такі монети, як, наприклад, пам'ятні українські гривні та пам'ятні монети номіналом 2 євро у країнах Євросоюзу. Останні досить сильно ускладнювали процес розпізнавання, адже усі монети євро мають спільний дизайн реверсу, і, хоча звичайні монети мають індивідуальні дизайни аверсу для монет кожної країни і інколи зазначення назви країни, на деяких пам'ятних монетах вказівки на країну походження є досить непомітними і для людини.

Для роботи із нейронною мережею було застосовано середовище Google Colab, яке надає потужності для створення, навчання, тестування та використання нейронних мереж. Блокноти Google Colab надають можливість працювати з відкритою бібліотекою для машинного навчання TensorFlow та Keras – надбудовою над нею. TensorFlow підтримує декілька популярних мов програмування, проте найбільш зручним та оптимальним вибором є саме мова Python, яка зазвичай використовується при розробці нейронних мереж.

Враховуючи специфіку вхідних даних, які передбачають прямокутне (300\*150 пікселів) зображення замість традиційно квадратного та вузько стандартизоване подання зображення (дві сторони монети на білому або світло-сірому фоні), і обмеженість ресурсів було вирішено застосувати власну нейронну мережу, що задається кодом на рис. 2.

```
model = keras.models.Sequential([
    keras.layers.experimental.preprocessing.Rescaling(1./255, input_shape=(150, 300, 3)),
    keras.layers.Conv2D(64, 3, activation='relu'),
    keras.layers.MaxPooling2D(),
    keras.layers.Conv2D(128, 3, activation='relu'),
    keras.layers.MaxPooling2D(),
    keras.layers.Conv2D(256, 3, activation='relu'),
    keras.layers.MaxPooling2D(),
    keras.layers.Flatten(),
    keras.layers.Dense(512, activation='relu'),
    keras.layers.Dense(256, activation='relu'),
    keras.layers.Dense(212)
])
```

Рис. 2. Задання нейронної мережі

Дана нейронна мережа є досить простою і містить три пари шарів згортки, що містять 64, 128 та 256 фільтрів розміру 3\*3 і чергуються з шарами максимізаційного агрегування (max pooling), що містять фільтри розміром 2\*2, які віднаходять і передають на наступний шар максимальне значення. На виході нейронної мережі розміщено 2 повноз'язних шари з функцією активації ReLU та кількістю нейронів 512 і 256 і один повноз'язний шар із 212 нейронів для класифікації. Граф отриманої нейронної мережі подано на рис. 3.

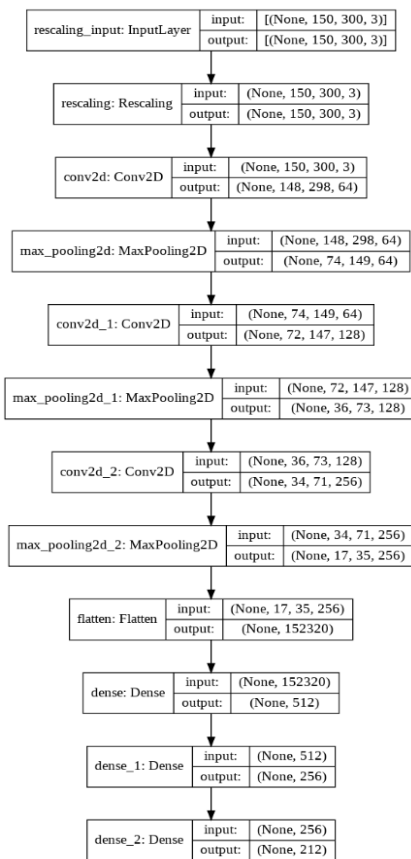


Рис. 3. Граф нейронної мережі

Результати роботи мережі, отримані після навчання протягом 10 епох у вигляді графіків точності розпізнавання та функції втрат на тренувальних та валідаційних даних (рис. 4).

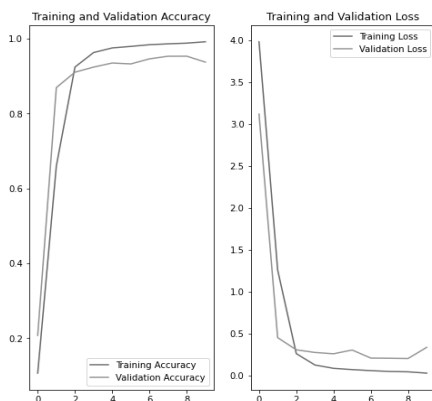


Рис. 4. Графік точності розпізнавання та функції втрат

За характером графіків валідаційних даних можна зробити висновок, що збільшення кількості епох призведе лише до перенавчання, коли мережа починає «завчати» тренувальні дані, збільшуючи при цьому точність їх розпізнавання, при майже незмінній точності на валідаційних даних. Точність розпізнавання на тестових даних становила 0,9365 (рис. 5).

```

    254/254 [=====] -
    18s 69ms/step - loss: 0.3274 - accuracy: 0.9365
    [0.32737427949905396, 0.9365196824073792]
  
```

Рис. 5. Результати тестування нейронної мережі

Протягом роботи над нейронною мережею було проведено декілька експериментів з її ускладненням шляхом додавання додаткових шарів та нейронів, проте таке ускладнення себе не виправдало, адже точність розпізнавання тестових даних не зазнала суттєвого збільшення, залишаючись у межах 93-94%, при цьому значно збільшився обсяг необхідних обчислювальних ресурсів та часу на навчання.

При аналізі причин досить низької точності використання класичної згорткової нейронної мережі можна помітити одну із особливостей даних – поточне визначення характеристик обігових монет («номінал, грошова одиниця, країна») надає досить вузьку класифікацію зображень і велику кількість класів (а саме 212), в межах кожного з яких є досить мало зображень, а мала кількість зображень при багатьох класах призводить до зменшення точності навчання.

При подальшому розгляді можна помітити, що кожен клас є складеним і його можна розділити на три окремих характеристики: номінал, грошову одиницю та країну. Кожна із таких характеристик окремо не є достатньою для однозначного визначення певної монети, проте не важко побачити, що при розпізнаванні монет, наприклад, виключно за номіналом, можна отримати значно меншу кількість класів для такої ж кількості тренувальних зображень, що призведе до більшої кількості зображень в межах кожного окремого класу, а отже і до кращих результатів розпізнавання за даною характеристикою. Це стосується і розпізнавання монет виключно за грошовою одиницею чи країною. При цьому, в той час, як розширення датасету за рахунок додавання, наприклад, зображень сучасних обігових монет ще однієї країни, до комбінованої характеристики необхідно додати близько десяти класів, до переліку класів країн можна додати лише один клас, а до переліку класів грошових одиниць та номіналів – від нуля до двох класів.

У випадку, коли невеликий за розмірами датасет містить велику кількість складених класів, можна звернутися до менш поширеної архітектури згорткової нейронної мережі із декількома виходами, що передбачає отримання на вхід зображення і повернення декількох векторів відповідностей, по одному для кожної із декількох класифікацій. Нейронна мережа з декількома виходами реалізується за рахунок розгалуження нейронної мережі на певному етапі, що призводить до утворення двох або більше гілок. Такі розгалуження можна утворювати на будь-якому етапі

нейронної мережі. Зазвичай таку мережу використовують тоді, коли виникає необхідність отримати дані різних форматів за допомогою різних підходів до їх обробки, наприклад, класифікацію та результат регресійного аналізу, проте вона є доречною і для зображень, які можуть мати декілька непов'язаних характеристик.

Під час розпізнавання обігових монет за допомогою згорткової нейронної мережі із декількома виходами можна отримати три вектори відповідностей, по одному для номіналу, грошової одиниці та країни, при цьому точність розпізнавання для кожної із характеристик буде суттєво більшою за точність розпізнавання звичайною мережею із одним виходом з застосуванням складених характеристик у якості класів. Ще однією з переваг такого підходу є можливість більш тонкого налаштування нейронної мережі та економії ресурсів при навчанні, якщо після розгалуження у якості шарів гілок застосувати попередньо навчені моделі, адже інколи моделі для різних харак-

теристик можуть навіть потребувати різної кількості епох тренування. У даній роботі представлено нейронну мережу із розгалуженням на три гілки на початку мережі, причому кожна із гілок представлена одним шаром, який являє собою звичайну згорткову модель. Для загальної нейронної мережі відмінності між певною послідовністю шарів та моделлю, яка являє собою таку саму послідовність шарів не виникне, проте це дозволить окремо навчити певну гілку та використати отримані ваги у загальній нейронній мережі. Код загальної нейронної мережі подано на рис. 6, а представлення у вигляді графу – на рис. 7.

```
input = keras.layers.Input((150, 300, 3))
value_layer = value_model(input)
currency_layer = currency_model(input)
country_layer = country_model(input)
new_model = keras.models.Model(inputs = input,
input, outputs = [value_layer, currency_layer, country_layer])
```

Рис. 6. Задання нейронної мережі з трьома виходами

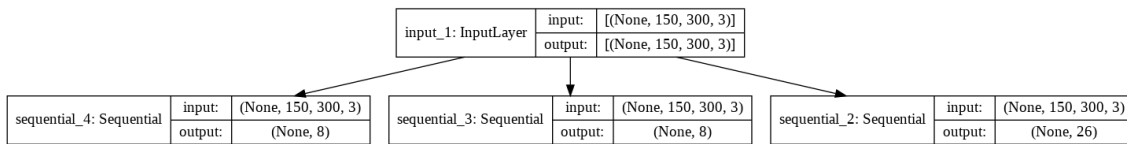


Рис. 7. Граф нейронної мережі з трьома виходами

Моделі value\_model, currency\_model та country\_model використані у якості згрупованих шарів і являються моделями для розпізнавання номіналу, грошової одиниці та країни відповідно. Структура цих моделей подібна до традиційної моделі згорткової нейронної мережі і відрізняються зменшеною кількістю нейронів останнього шару для класифікації – 8 для моделей номіналу та грошової одиниці і 26 для моделі країни. Навчання кожної із моделей відбувалося окремо, причому розподіл даних на тренувальні та тестові залишився не змінним, в той час як розподіл даних на виключно тренувальні та валідаційні відрізнявся для різних моделей.

Результати навчання моделі для розпізнавання номіналу, грошової одиниці та країни подані на рис. 8 у вигляді графіків точності розпізнавання та функції втрат на тренувальних та валідаційних даних. Точність розпізнавання на тестових даних становила 0,9941 для номіналу, 0,9989 для грошової одиниці та 0,9641 для країни (рис. 9).

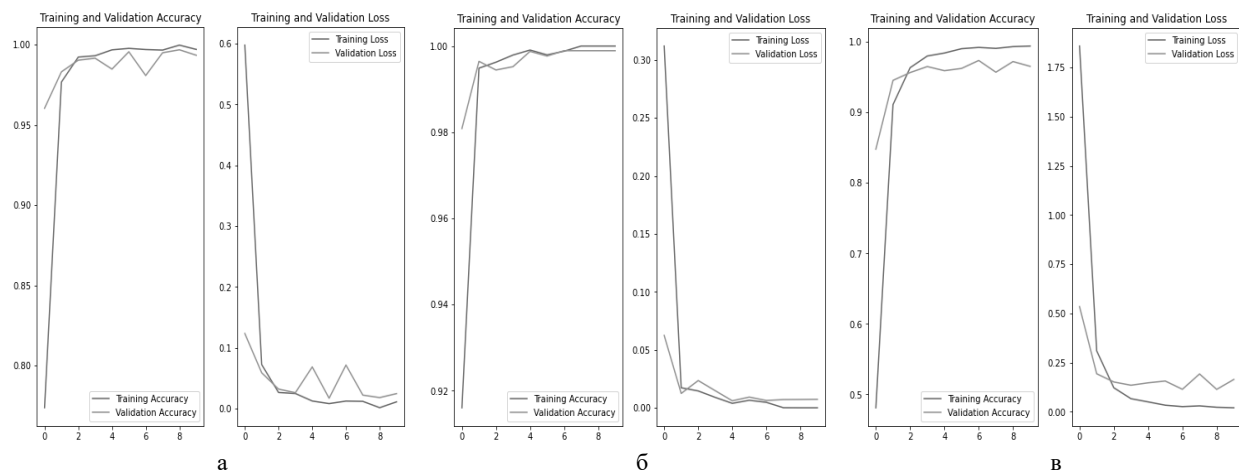


Рис. 8. Графіки тренування моделі розпізнавання: а – номіналу; б – грошової одиниці; в – країни

За отриманими графіками видно, коли для кожної окремої моделі починається перенавчання, що дозволяє визначити необхідну кількість епох навчання для кожної окремої моделі.

Проаналізувавши отримані результати для тестових даних можна помітити, що точність розпізнавання номіналу та грошової одиниці є досить висо-

кою, приблизно 99%, а точність розпізнавання країн менша, у межах 96-97%. Менша точність пояснюється, зокрема більшою кількістю класів та специфічною вхідних даних, зокрема наявністю у датасеті зображень пам'ятних монет номіналом 2 євро ускладнює визначення приналежності цих монет до певної країни Євросоюзу.



```
254/254 [=====] - 18s 69ms/step - loss: 0.0236 - accuracy: 0.9941
[0.023559754714369774, 0.994071900844574]
```

а

```
254/254 [=====] - 18s 70ms/step - loss: 0.0035 - accuracy: 0.9989
[0.003485651919618249, 0.9988884925842285]
```

б

```
254/254 [=====] - 18s 70ms/step - loss: 0.1752 - accuracy: 0.9641
[0.1752026081085205, 0.9640607833862305]
```

в

Рис. 11. Результати тестування моделі розпізнавання: а – номіналу; б – грошової одиниці; в – країни

Неважко побачити, що точність розпізнавання номіналу, грошової одиниці та країни окремо вища за результат, отриманий при застосуванні традиційної мережі, при цьому ми із досить високою вірогідністю отримуємо правильно визначений номінал та грошову одиницю.

Якщо визначити загальну точність розпізнавання зображень як добуток результатів кожної з гілок, ми отримаємо підсумкову точність величиною 0,9574, що перевищує точність традиційної згорткової нейронної мережі на 0,0209, що є досить непоганим приростом. При більш гнучкому налаштуванні і тренуванні кожної окремої моделі, що входять до складу згорткової нейронної мережі з трьома виходами, можна і надалі покращити отриманий результат.

### Висновки

Задача розпізнавання монет за зображенням через свою специфіку дозволяє застосувати декілька підходів до розбиття зображень на класи, а отже і до побудови згорткової нейронної мережі. У роботі було наведено традиційний підхід, коли кожне зображення визначається одним складеним класом, що

одночасно вказує на номінал, грошову одиницю та країну і нейронна мережа має один вихід та підхід із використанням нейронної мережі з декількома виходами, коли кожна із характеристик зображення являє собою окрему класифікацію і нейронна мережа має три виходи, по одному для кожної із них.

Через велику кількість малих за обсягом зображень класів при традиційному підході результат розпізнавання виявився не найкращим, 93-94%, при цьому розгалуження нейронної мережі на три гілки для кожної окремої характеристики надало хороший результат у 99% для номіналу та грошової одиниці і 95-96% для країни. Перевагою такого підходу є можливість більш гнучко налаштувати та навчити окремі моделі для кожної характеристики та використати їх у якості шарів окремих гілок нейронної мережі. Недоліком такого підходу є в декілька разів більша кількість параметрів нейронної мережі, що означає суттєве збільшення часу на її навчання та використання ресурсів, при цьому окреме тренування вкладених моделей дозволить зменшити кількість ресурсів, що одночасно задіяні під час навчання мережі.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Хайкин Саймон. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд. : пер. с англ. / Саймон Хайкин. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
2. Ямпольский Леонид Стефанович. Нейротехнології та нейрокомп'ютерні системи : підручник / Л.С. Ямпольский, О.І. Лісовиченко, В.В. Олійник. – К. : Дорадо-Друк, 2016. – 576 с.
3. A Survey on Multi-output Learning / [D. Xu, Y. Shi, I. Tsang та ін.]. – 2019. – 21 с.
4. A survey on multi-output regression / H.Borchani, G. Varando, C. Bielza, P. Larranaga. – 2015. – 27 с.
5. CS231n Convolutional Neural Networks for Visual Recognition [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://cs231n.github.io>.
6. Keras API reference [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://keras.io/api/>.
7. LeCun Y. Convolutional Networks for Images, Speech, and Time-Series / Y. LeCun, Y. Benigo. – 1995. – 14 с.
8. Module: tf | TensorFlow Core v2.6.0 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://www.tensorflow.org/api\\_docs/python/tf?hl=en](https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf?hl=en).

Received (Надійшла) 15.05.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.07.2021

### Improving the accuracy of circulating coins recognition by using a convolutional neural network with multiple outputs

Ye. Vaivala, N. Tsyopa

**Abstract.** The article considers the problem of circulating coins recognition using convolutional neural networks. A traditional approach to solving the problem of image recognition, which involves the use of a regular convolutional neural network with one output, is described, the results are shown and analyzed. To improve the recognition accuracy, the architecture of a convolutional neural network with multiple outputs was used. The results obtained were compared with the results of a regular network, the reasons for the differences in the results and the advantages and disadvantages of each of the considered approaches were given.

**Keywords:** convolutional neural network, multi-output neural network, image recognition, machine learning.

М. О. Волк, М. В. Гора, В. Г. Демчук, Т. І. Ольшанська, О. В. Ткаленко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## МОДИФІКОВАНИЙ МЕТОД САМОВІДНОВЛЕННЯ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ДАМПУ ПАМ'ЯТІ

**Анотація.** Предметом статті є дослідження методів самовідновлення програмних систем. Мета статті полягає у підвищенні ефективності засобів самовідновлення програмних систем шляхом розробки модифікованого методу самовідновлення програмних систем з використанням дампу пам'яті. Використаними методами є методи декомпозиції складних систем, методи самовідновлення програмних систем, методи теорії множин. Отримані такі результати: модифіковано моделі програмних компонент системи та обчислювальних ресурсів, модифіковано метод самовідновлення програмних систем з використанням дампу пам'яті. **Висновки.** Розроблено модифікований метод самовідновлення розподіленого програмного забезпечення програмних систем з використанням дампу пам'яті, який на відміну від існуючого, забезпечує самовідновлення роботи програмної системи на віддалених ресурсах у тому стані, в якому вона перебувала у момент відмови одного з ресурсів, що відбувається в умовах зменшення кількості ресурсів.

**Ключові слова:** програмна система, самовідновлення, розподілені ресурси, дампи пам'яті.

### Вступ

Розподілені програмні системи розробляються в умовах перманентного розвитку апаратних платформ, операційних систем, хмарних сервісів. Часто вони мають складну розподілену структуру, а елементи системи розташовані на віддалених комп'ютерах або віртуальних ресурсах. Іноді відбувається відмова одного з програмних компонентів, гіпервізорів, каналів передачі даних або один з задіяних сервісів не може впоратися з поточним підвищенням навантаження. Також завжди є ймовірність впливу на функціонування програмних компонент зовнішніх факторів. Існує декілька підходів до відновлення функціонування системи у таких випадках, зокрема забезпечення функціональної стійкості та живучості обчислювального процесу [1].

Одним з існуючих механізмів, які забезпечують функціональну стійкість та живучість технічних систем є самовідновлення. У програмних системах термін «самовідновлення» встановлює властивість будь-якої програми, сервісу або операційної системи, яка здатна виявляти ситуації, коли програма не функціонує стандартно, та без будь-якого зовнішнього втручання оператора зробити необхідні дії, які відновлять працездатність системи в звичайному стані [2, 3]. Аналогічні дії така система може виконувати також у випадках ймовірної відмови програм, апаратних компонентів або каналів передачі даних [3]. Процес самовідновлення робить програмну систему здатною періодично перевіряти свій стан, приймати рішення щодо оптимізації, адаптації до різних умов та відновлювати працездатність.

**Аналіз публікацій.** Засоби самовідновлення можуть бути реалізовані як самостійно, так і з використанням існуючих компонентів комп'ютерних систем. Вони можуть використовувати апаратні засоби (hardware), системне програмне забезпечення (middleware), та стороннє прикладне програмне забезпечення (software або software system) [2-5].

Самовідновлення на рівні прикладного програмного забезпечення - це здатність окремого додатка,

програмної системи або процесу відновити працездатність зсередини [3, 5]. Зазвичай, у програмних фреймворках (наприклад, у платформі .NET або віртуальній машині Java), такі випадки обробляються винятками (an exception), які аналізують помилку та можуть здійснювати кроки по її виправленню. У випадку виключення, програміст має можливість різної реакції: ігнорувати збій та виконувати програму далі, перервати виконання (exit) програми, додати функцію (function) обробки, яка виправить ситуацію, або взагалі перезавантажити програму. На сьогодні є ефективні засоби обробки виключень самою програмою, наприклад, існують шаблони проектування (templates), які автоматизовано створюють програмні системи з функціями самовідновлення [6, 7].

Можливе також самовідновлення на системному рівні. Зазвичай виконується операційною системою, фреймворком або гіпервізором. Засоби системного рівня застосовуються до всіх програм незалежно від особливостей їх внутрішньої реалізації та побудовані на стандартних сервісах операційних систем. Ці засоби можна використовувати на будь-якому рівні комп'ютерної системи, що функціонує під керуванням мережної операційної системи. Як приклад відновлення системного рівня можна розглядати повторний запуск процесу, який відмовив або не відповідає.

Якщо відбуваються відмови апаратних засобів, самовідновлення відповідає за пошук нових ресурсів, за якими буде відбуватися перерозподіл програмних компонентів з обов'язковим встановленням нових мережних зв'язків. Ефективність роботи системи у таких випадках залежить від наявності підсистем моніторингу, які накопичують інформацію про стан програм, обладнання, каналів зв'язку, та, у випадках виявлення збоїв, забезпечують перерозподіл комп'ютерних ресурсів [8-12].

**Постановка проблеми.** Для реалізації механізмів самовідновлення у програмних системах існують ряд методів. Один з них – метод самовідновлення програм з використанням дампу пам'яті. Це один з універсальних методів, який дозволяє зберігати стан програмних компонентів у часі та оновлювати стан

при перезапуску програм. Також цей метод є не складним за реалізацією і багато його етапів можна реалізувати вбудованими засобами операційної системи (наприклад, механізмами баз даних або автозбереження). Але цей метод серед існуючих має найбільшу вартість, виходячи з об'ємів фізичної пам'яті для зберігання даних та часу виконання.

Для зменшення вартості виконання та розширення можливостей засобів самовідновлення в програмних системах, запропоновано модифікацію методу, який дозволяє розміщення декількох програм на одному обчислювальному ресурсі, виконує постійний моніторинг наявних віддалених ресурсів.

**Мета статті** полягає у підвищенні ефективності засобів самовідновлення програмних систем шляхом розробки модифікованого методу самовідновлення програмних систем з використанням дампу пам'яті.

### Моделі програмних компонентів та обчислювальних ресурсів

В роботі було використано моделі та визначення, які були введені в роботі [9]. На рис. 1 наведено структуру обчислювального середовища. Програмні компоненти  $P_i$ , які є елементами множини програмної системи, складаються з двох складових: бінарний код програми, який реалізує поведінку програми ( $Cd$ ), і локальних даних ( $Dt$ ), які формують стан процесу в кожен момент часу. Код програм можна розділити на такі групи: прикладний ( $Cd_u$ ), моніторингу ( $Cd_m$ ), збереження даних ( $Cd_s$ ). Так само локальні дані можна поділити на внутрішні дані програми, які фіксують стан ( $Dt_s$ ) та дані моніторингу або результату ( $Dt_r$ ), що передаються в систему управління обчислювальним процесом.

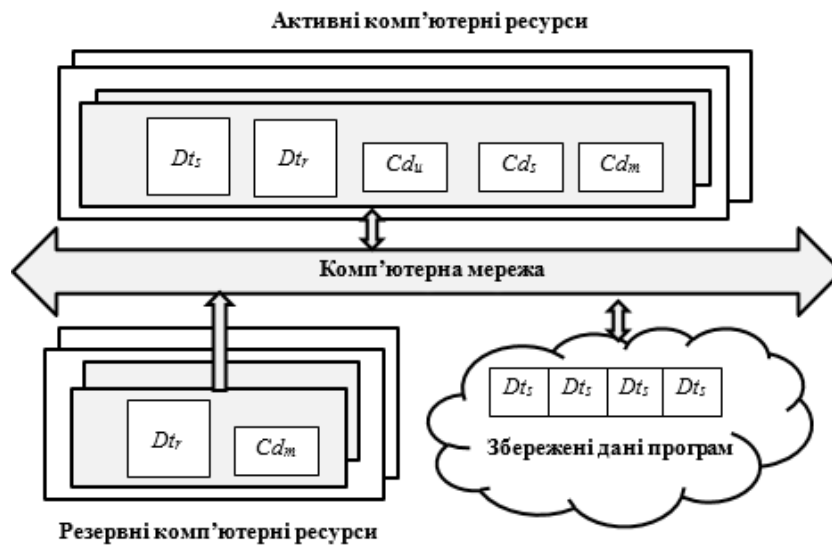


Рис. 1. Структура середовища виконання розподіленої програмної системи

Таким чином, програмна система може бути представлена моделлю:

$$PS = \bigcup_i P_i, i = \overline{1, N},$$

$$P = \{ \bigcup (Cd, Dt) = \{ Cd_u, Cd_m, Cd_s, Dt_s, Dt_r \} \}, \quad (1)$$

де  $N$  – кількість програм в системі.

Запропонуємо новий компонент системи самовідновлення, який дає можливість при наявності тексту програм та компілятора, який генерує бітовий код програмних компонентів під час виконання завдання. Тоді до множини програмних компонентів системи додамо компілятор  $Cd_C$ , а до даних завдання додаємо файли з програмними компонентами на високорівневих мовах програмування  $Dt_P, i = \overline{1, N}$ . У гетерогенному комп'ютерному середовищі кількість компіляторів  $Cd_{Ck}, k = \overline{1, K}$  залежить від кількості ймовірних операційних систем, на яких можна запустити програмний компонент  $P_i$ . Таким чином, множина ресурсів, які використовуються під час процесу обчислень, може набути атрибуту за ознакою можливості отримання компільованої версії програми  $P_i$  на обчислювальному

ресурсі  $R_j$ .

Введемо функцію  $\varphi(Dt_{P_i}, R_j)$ , що виконує оцінку можливості отримання програми  $P_i$  при наявності вхідного коду  $Dt_{P_i}, i = \overline{1, N}$ , компілятора для програмно-апаратної платформи  $Cd_{Ck}, k = \overline{1, K}$ , для окремого обчислювального ресурсу  $R_j$ :

$$\varphi(Dt_{P_i}, R_j) = \begin{cases} P_i^j, & \text{якщо } \exists Cd_{Ck}, k = \overline{1, K}, \\ \emptyset, & \text{в іншому випадку} \end{cases} \quad (2)$$

Якщо  $\varphi(Dt_{P_i}, R_j) \neq \emptyset$ , то можлива процедура отримання програмного коду  $Dt_{P_i} \xrightarrow{Cd_{Ck}} P_i$  для апаратно-програмної платформи даного комп'ютерного ресурсу. Обчислювальні ресурси (звичай окремі комп'ютери) становлять множину  $R = \{ R_j \}, i = \overline{1, M}$ , де  $j$  – номер комп'ютера, а  $N$  – кількість доступних комп'ютерів у мережі. Серед наявних ресурсів можна виділити активні  $R_a$ , які задіяні в обчислювальному процесі та резервні, які з боку системи знаходяться у режимі простою  $R_r$ :

$$R = R_a \cup R_r \quad (3)$$

Будь-який комп'ютер, що залучений до процесу розподілених обчислень описується множиною параметрів, наприклад, архітектурною процесора, операційною системою, об'єм оперативної пам'яті тощо. В залежності від типу завдань, ця множина може бути розширена [8]. Множина ресурсів (3) зазвичай змінюється (видалення, додавання комп'ютерів в систему, завантаження сегментів комп'ютерної мережі, еволюція кластерів, операційних систем, драйверів тощо). Обчислювальними ресурсами можуть виступати як окремі комп'ютери, мікроконтролери, так і локальні, глобальні мережі, кластери, віртуальні, хмарні обчислювачі.

### Модифікований метод забезпечення самовідновлення з використанням дампу пам'яті програмних компонент

Метод забезпечення самовідновлення з використанням дампу пам'яті програмних компонент серед існуючих методів має найбільшу вартість виходячи з об'ємів фізичної пам'яті та часу збереження і оновлення даних. З іншого боку, він може бути реалізованим вбудованими засобами сучасних операційних систем або віртуальних машин (прикладом можуть бути засоби механізму гібернації), та не є складним з боку програмування [13, 14].

Розглянемо етапи модифікованого методу самовідновлення обчислювального процесу в гетерогенних обчислювальних системах на основі дампу пам'яті програм.

1. На першому етапі виконується розподіл програм за комп'ютерами згідно схеми призначення. Програми завантажуються на віддалені ресурси, проходять ініціалізацію (приводяться до початкового стану), та очікують синхронізації та запуску. Початковий стан усіх програм з системи виконуємо шляхом виклику процедури збереження дампу пам'яті  $P_{\text{dump } i}(t_0)$  для усіх  $N$  програм, які знаходяться у програмній системі. Атрибут часу для усіх даних дорівнює індексу початкового часового інтервалу ( $q=0$ ). Це надає можливість збереження та відновлення початкового стану програмної системи.

2. Знаходження комп'ютерних ресурсів, які є вільними після реалізації схеми призначення (пункт 1) та потенційно можуть бути використані для розміщення програм з завдання:

$$R^e = \bigcup_{m=1}^M R_m \setminus \bigcup_{i=1}^N R_i \mid r = j, \forall \{P_i \rightarrow R_j\}, \quad (4)$$

якщо  $R^e = \emptyset, R^e = \bigcup_{m=1}^M R_m.$

Можлива ситуація, коли обчислювальних ресурсів недостатньо та множина кількості ресурсів з (3.2) дорівнює

$$R^e = \emptyset.$$

Тоді, можна прийняти

$$R^e = \bigcup_{m=1}^M R_m.$$

Можлива модифікація методу, в якому підмножина враховує коефіцієнти використання комп'ютерних ресурсів.

3. Кожному з ресурсів з множини (4) ставиться у відповідність підмножина програмних компонентів, які можливо виконувати на даному обчислювальному ресурсі  $R_{ij}^e$ . Для отримання підмножин використовується функція (2). Алгоритм знаходження підмножин полягає у наступному:

3.1. Ініціалізація змінної  $j=1$ , яка відповідає за перебіг потенційно вільних ресурсів з множини (3).

3.2. Ініціалізація змінної  $i=1$ , яка відповідає за перебіг усіх програмних компонент.

3.3. Включення в підмножину  $R_{ij}^e$  ресурсу, який задовольняє вимогам (2):

$$R_{ij}^e = R_{ij}^e \cup \varphi(Dt_{P_i}, R_j);$$

3.4. Збільшення індексу  $i=i+1$ . Якщо  $i < N$ , перехід до п.п. 3.3.

3.5. Збільшення індексу  $j=j+1$ . Якщо  $j < M$ , перехід до п.п. 3.2.

4. Визначити наступний момент часу  $t_q, q=q+1$  виконання дампу пам'яті програмних компонентів. Виконати перевірку умов закінчення обчислень. Якщо умова виконана, перехід до пункту 9.

5. При досягненні часу  $t_q$  отримати збереження усіх програмних компонент множини

$$\bigcup_{i=1}^N P_{\text{dump } i}(t_q).$$

У випадку, коли усі програми виконано, переходимо до пункту 3. У випадку, коли залишилися програми, або відповідь від програми одержано, переходимо до пункту 6.

6. Визначаємо підмножину програм з завдання, від яких не отримано даних (дампу пам'яті не виконано)  $P^{Err} \subset P$ .

7. Для отриманої множини  $P^{Err}$  зробити перерозподіл ресурсів за новою схемою призначення:

$$Sh^{Err} = \{P^{Err} \xrightarrow{R_{ij}^e} R^e\}$$

з урахуванням наявності відкомпільованих програмних компонент. Компіляцію можливо виконати заздалегідь або під час перерозподілу.

8. Завантаження програм у відповідності до схеми призначення на обчислювальні ресурси  $Sh^{Err}$ . Виконати ініціалізацію програм та відновити стан програми, виконуючи функцію  $P_{\text{dump } i}(t_q)$  для усіх програм ( $q=0$ ) з множини  $P^{Err}$ . Перехід до пункту 2 даного методу.

9. Завершення виконання програмного завдання, закриття програм управління обчислювальним процесом.

Метод виконує відновлення функціональності програмної системи.

Під час роботи, метод потребує часу для виконання перезавантаження та пошук ресурсу, оновлення даних пам'яті програм зі зроблених дампу пам'яті.

Протягом даного часу система може не відповідати, якщо призупинено критичні програмні компоненти, або продовжувати виконання набору інших функцій.

### Висновки

Авторами запропоновано модифікований метод самовідновлення розподіленого програмного забезпечення програмних систем з використанням дампу пам'яті. Серед найбільш важливих можливостей, що надає метод, є самовідновлення роботи програмної

системи на віддалених ресурсах у тому стані, в якому вона перебувала у момент відмови одного з ресурсів та зменшення кількості ресурсів в порівнянні з класичним методом. Останнє є важливою особливістю, тому що стандартний метод є дуже ресурсно-затратним.

Напрямок подальших досліджень методу самовідновлення може бути розробка модифікацій методу, який зменшує час відновлення програмної системи, що є важливим для програмних систем реального часу.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. І.П. Саланда, О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко. Система показників та критеріїв формалізації процесів забезпечення локальної функціональної стійкості розгалужених інформаційних мереж. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2017. – Т. 1 (41). – С. 122-126.
2. Schneider, C., Barker, A., & Dobson, S. A survey of self-healing systems frameworks. *Software: Practice and Experience*, 45(10), 2015. pp. 1375-1398.
3. Manzoor A., Rajput U., Phulpoto N., Abbas F., Rajput M. Self-healing in Operating Systems. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, Vol.18 No.5, May 2018, pp.92-98.
4. Hudaib, AA., Fakhouri, HN., Al Adwan, FE., & Fakhouri, SN. A Survey about Self-Healing Systems (Desktop and Web Application), *Communications and Network*, Vol.09 No.01, 2017, pp.71-88.
5. Wang, Z., & Wang, J. Self-healing resilient distribution systems based on sectionalization into microgrids, *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(6), 2015, pp.3139-3149.
6. Duarte, DP., Guaraldo, JC., Kagan, H., Nakata, BH., Pranskevicius, PC., Suematsu, AK., & Hoshina, MS. Substation-based self-healing system with advanced features for control and monitoring of distribution systems. In *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016 17th International Conference on 2016, October, IEEE*, pp. 301-305.
7. Ansari, B., Simoes, MG., Soroudi, A., & Keane, A. Restoration strategy in a self-healing distribution network with DG and flexible loads. In *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2016 IEEE 16th International Conference 2016, June, IEEE*, pp. 1-5.
8. De Lemos, R., Giese, H., Muller, H.A., Shaw, M., Andersson, J., Litoiu, M., Schmerl, B., Tamura, G., Villegas, N.M., Vogel, T., et al.: Software engineering for self-adaptive systems: a second research roadmap. In: *Software Engineering for Self-Adaptive Systems II*, Springer, 2013, pp. 1–32.
9. Рубан І.В., Волк М.О., Рісучін М.В. Метод самовідновлення розподіленого програмного забезпечення в гетерогенних комп'ютерних системах. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2019. № 3 (64), с. 17-23/
10. Коломійцев О. В. Метод розрахунку розміру буферної пам'яті самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі / Oleksii Kolomiitsev, Alnaeri Frhat Ali, Inna Petrovska // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2021. – Т. 2 (64). – С. 144-147. – doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.2.144>.
11. Ткачов, В., Коваленко, А., Кучук, Г., & Ні, Я. (2021). Метод забезпечення живучості високомобільної комп'ютерної мережі. *Сучасні інформаційні системи*, 5(2), 159–165. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.24>
12. Кучук, Н., Шефер, О., Чернева, Г., & Алнаєрі, Ф. А. (2021). Визначення пропускних здатностей самовідновлювального сегмента мережі. *Сучасні інформаційні системи*, 5(2), 114–119. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.16>
13. Volk M.O., Klenov A.E., Shkruty D.A. Programs survivability method for distributed computing systems. *Проблеми інформатизації: Матеріали п'ятої міжнародної науково-технічної конференції. Черкаси, Баку, Бельсько-Бяла, Полтава; 13–15 листопада 2017. С. 27.*
14. Волк М. А., Клєнов А. Е. Исследование методов обеспечения живучести системного программного обеспечения. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. Матеріали восьмої міжнародної науково-технічної конференції. Полтава – Баку – Харків – Жиліна. 2018. С. 40.*

Received (Надійшла) 08.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

### The modified method of self-healing software systems using a memory dump

M. Volk, M. Gora, V. Demchuk, T. Olshanska, O. Tkalenko

**Abstract.** The article **subject** is the study of methods for self-healing of software systems. The **purpose** of the article is to improve the efficiency of self-healing tools for software systems by developing a modified method for self-healing software systems using a memory dump. The **methods** used are methods of decomposition of complex systems, methods of self-healing of software systems, methods of set theory. The following **results** were obtained: the model of the software components of the system and computing resources was modified, the method of self-recovery of software systems using a memory dump was modified. **Conclusions.** A modified method of self-recovery of distributed software of software systems using a memory dump has been developed, which, unlike the existing one, provides self-healing of the software system on remote resources in the state in which it was at the moment of failure of one of the resources, occurs in conditions of a decrease in the number of resources.

**Keywords:** software system, self-healing, allocated resources, memory dump.

G. Golovko, V. Pokhodun

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

## ANALYSIS AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF MODULAR MULTIPLICATION-BASED BLOCK CIPHER

**Abstract.** This article highlights the ever-increasing need and importance of information protection and data safety in modern reality, presents the possibilities of encrypting data using the tools of cryptography, particularly concentrating on the Modular Multiplication-based Block Cipher. Review of available sources indicated that there are no publicly accessible software implementations of the algorithm available at the moment of writing this article. To achieve a goal of creating such an implementation, information has been compiled for creating a comprehensible and adequate mathematical description of the algorithm. Presented the information security system, an application in C # to encrypt files of any extension using the block encryption algorithm MMB.

**Keywords:** MMB, information protection, information security, cryptography, complex methods of information protection, encryption.

### Introduction

Cryptography is an integral part of the information security world. It is necessary whenever the secrecy of communications is required to be kept or when authenticity of an incoming message needs to be proven. It can be used for developing multiple multi-party protocols in such a way, that makes its surpassing, cracking or cheating extremely difficult and prohibitively expensive [1]. In fact, range of application of cryptography is astoundingly wide and it would have been impossible to compile any remotely complete list of all the functional abilities that can be achieved through its use.

Historically, the oldest and the main aim of cryptography is confidentiality of the information and there is a variety of methods and algorithms existing that can be used for reaching such a goal. One of them is the Modular Multiplication-based Block Cipher, also known as MMB.

**The research purpose.** Study of mechanisms and algorithms for personal data protection with further development of a software product that provides an interface for reliable encryption of confidential information and becomes an easily accessible public implementation of an MMB cipher, which at the moment there is a lack of. Mathematical formalization of algorithms, implementation of encryption algorithms, substantiation of reliability of use, application of algorithm.

**Literature review.** When analyzing issues related to information security, it is necessary to take into account the specifics of this aspect of security such as it being an integral part of information technology - an area that is developing at an unprecedented rate. What is important here is not so much individual solutions (laws, training courses, software and hardware) that are at the current level, but mechanisms for generating new solutions that allow to live in the pace of technological progress.

With an increasing effect information has on our life, so does its protection increasingly become a much more prominent recurring topic in a variety of scientific research. This applies to cryptography. But,

interestingly enough, it can be quite a challenging task to find information on a specific method or algorithm, especially if it's less used comparatively to some other more popular ones.

Majority of information about MMB cipher can be found in the works of its creator himself, Joan Daemen [2], but there are also works by other authors, such as Wang M., Nakahara J., Sun Y [3] and Bruce Schneier [4].

After a thorough review and analysis, we can conclude that there are no easily available public implementations of MMB cipher in any of the popular programming languages, further supporting the importance of the goals set by this work.

### Research results

Block cipher of MMB has been created by Joan Daemen[5] back in 1993 and was proposed as an alternative to the IDEA cipher[6]. MMB was developed specifically to withstand the differential cryptanalysis [7]. Its main innovation has become the use of cyclical multiplication inside of the  $Z_2^{n-1}$  group, where  $n$  – is the length of a single word on which operations will be performed upon. All internal operation in MMB are performed with  $n$ -bit words. The creators of the cipher proposed  $n = 32$ , thus multiplication are made inside the  $Z_2^{32-1}$  range. It is also worth mentioning that

$$2^{32} - 1 = (2^{16}+1) \cdot (2^8+1) \cdot (2^4+1) \cdot (2^{12}+1) \cdot (2^3+1) = 65537 \cdot 257 \cdot 17 \cdot 5 \cdot 3 = 4294967295,$$

product of all the Fermat numbers. MMB is an iterative cipher, which consists of six rounds. MMB operates with 128-bit text sub-blocks and uses a 128-bit key. Flowchart of the algorithm is presented in Fig. 1.

MMB operates with 32-bit sub-blocks of text ( $x_0, x_1, x_2, x_3$ ) and 32-bit sub-blocks of key ( $k_0, k_1, k_2, k_3$ ). This makes it convenient to implement the algorithm on the 32-bit processors. Iterating with XOR operation, the non-linear function  $f$  is performed six times.

The algorithm:

$$x_i = x_i \oplus k_i, \text{ for } I = 0 \text{ to } 3$$

$$f(x_0, x_1, x_2, x_3)$$

$$x_i = x_i \oplus k_{i+1}, \text{ for } I = 0 \text{ to } 3$$

$$f(x_0, x_1, x_2, x_3)$$

$$x_i = x_i \oplus k_{i+2}, \text{ for } I = 0 \text{ to } 3$$

$$f(x_0, x_1, x_2, x_3)$$

$$x_i = x_i \oplus k_i, \text{ for } I = 0 \text{ to } 3$$

$$f(x_0, x_1, x_2, x_3)$$

$$x_i = x_i \oplus k_{i+1}, \text{ for } I = 0 \text{ to } 3$$

$$f(x_0, x_1, x_2, x_3)$$

$$x_i = x_i \oplus k_{i+2}, \text{ for } I = 0 \text{ to } 3$$

$$f(x_0, x_1, x_2, x_3)$$

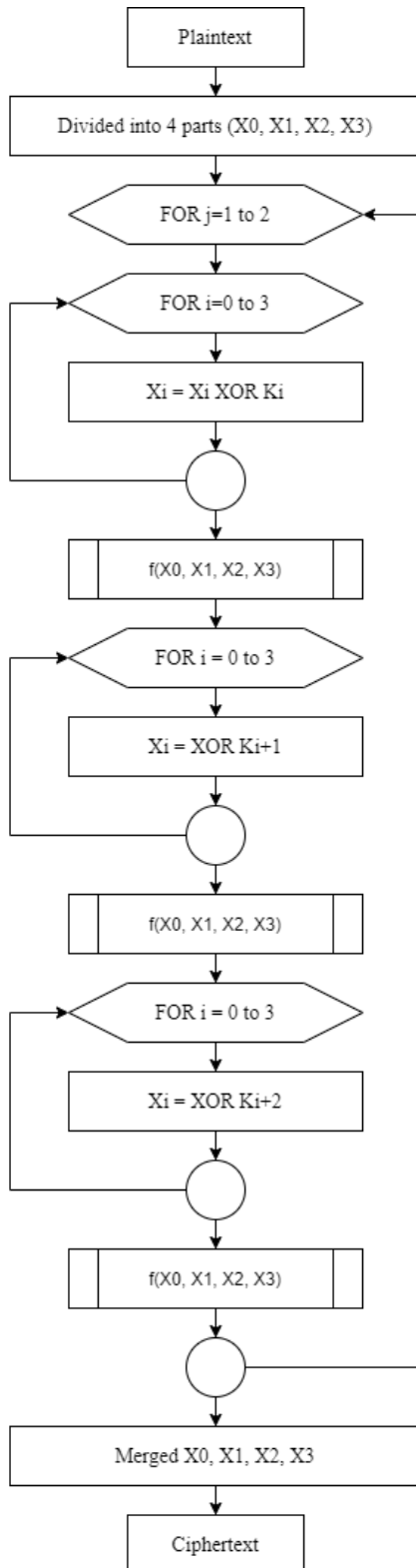


Fig. 1. MMB algorithm flowchart

Function  $f$  has three stages:

(1)  $x_i = c_i$ , for  $I = 0$  to  $3$  (If all bits of input are 1, then outputs bits are also all 1)

(2) If the least significant bit  $x_0 = 1$ , then  $x_0 = x_0 \oplus C$ .

If the least significant bit  $x_3 = 1$ , then  $x_3 = x_3 \oplus C$ .

(3)  $x_i = x_{i-1} \oplus x_i \oplus x_{i+1}$ , for  $I = 0$  to  $3$

All indexed operations are performed by the module 3. Multiplications at the stage (1) are performed by the module  $2^{32}-1$ .

In this algorithm if the second operand =  $2^{32}-1$ , then result is also  $2^{32}-1$ .

Constants used:

$$C=2\text{aaaaaaa};$$

$$c_0=025\text{f1cdb};$$

$$c_1=2 * c_0;$$

$$c_2=2^3 * c_0;$$

$$c_3=2^7 * c_0.$$

The constant  $C$  is the "simplest" constant with a high ternary weight, zero least significant bit and no circular symmetry.

The constant  $c_0$  has slightly different characteristics. Other constants are offset versions of  $c_0$ , and are used to prevent symmetry-based disclosure.

Decryption is the reverse process.

The MMB cipher block has the structure of a substitution-permutation network (SP-network) and works in 128-bit text blocks, uses a 128-bit key and has six iterations. One round of MMB consists of four transformations:  $j$ :

- $\sigma[k^j]$ : exclusive disjunction is applied to each data word with sub-key block  $k^j$ , where  $j$  is the index of the round. The formal representation is represented in formula (1), where  $\oplus$  means bitwise exclusive disjunction,  $a_i, k_i^j \in \mathbb{Z}_{2^{32}}$  for  $0 \leq i \leq 3$ .

The operation  $\sigma[k^j]$  is an involution and is the only operation that depends on key in the round.

$$\sigma[k^j](a_0, a_1, a_2, a_3) = (a_0 \oplus k_0^j, a_1 \oplus k_1^j, a_2 \oplus k_2^j, a_3 \oplus k_3^j) \quad (1)$$

- $\gamma$ : modular multiplication of each word of data with fixed 32-bit constants  $G_i$  (Formula 2), where

$$a \otimes b = a * b \text{ mod } (2^{32} - 1),$$

$$G_0 = 025\text{F1CDBx},$$

$$G_1 = 2 \otimes G_0 = 04\text{BE39B6x},$$

$$G_2 = 8 \otimes G_0 = 12\text{F8E6D8x},$$

$$G_3 = 128 \otimes G_0 = 2\text{F8E6D81x},$$

which can be efficiently calculated because

$$(A * 2^x) \text{ mod } (2^{32} - 1) = (A \ll x) \text{ mod } (2^{32} - 1).$$

In multiplication modulo  $2^{32} - 1$ , a wrapping effect is observed, because  $2^{32} \equiv 1 \text{ mod } (2^{32} - 1)$ , which means that the bits on the  $(32 + i)$ -th LSB (lower bit) position are shifted to the  $i$ -th position of the LSB.

This effect is similar to the multiplication operation modulo  $2^{16} + 1$  in IDEA.

The whole operation can also be described by formula 3.

$$\gamma(a_0, a_1, a_2, a_3) = (a_0 \oplus G_0, a_1 \oplus G_1, a_2 \oplus 2, a_3 \oplus G_3) \quad (2)$$

$$a \otimes b = a * b \bmod (2^{32} - 1) = \left( a * b \bmod 2^{32} + \left\lfloor \frac{a * b}{2^{32}} \right\rfloor \right) \bmod (2^{32} - 1) \quad (3)$$

Note that  $\gamma$  is inverse but not involution. Each 32-bit multiplication can be interpreted as a huge  $32 \times 32$ -bit S-block, because one of the operands in the multiplication is always fixed. For any  $G_i$  there are two fixed points:  $0 \otimes G_i = 0$ , and  $(2^{32} - 1) \otimes G_i = 2^{32} - 1$ .

- $\eta$ : data-dependent transformation that works on two of the four inputs of the word  $(a_0, a_1, a_2, a_3)$  (Formula 4), where 'lsb' denotes the least significant (least significant) bit, and  $\delta = 2\text{aaaaaaax}$ ;  $\eta$  is an involution and a nonlinear operation.

$$\eta(a_0, a_1, a_2, a_3) = (a_0 \otimes (\text{lsb}(a_0) * \delta), a_1, a_2, a_3 \otimes (1 \otimes \text{lsb}(a_3) * \delta)) \quad (4)$$

- $\theta$ : the sole diffusion operation in MMB (Formula 5), where  $a_i \in \mathbb{Z}_{2^{32}}$ , at  $0 \leq i \leq 3$ .  $\theta$  – involution

$$\theta(a_0, a_1, a_2, a_3) = (a_3 \otimes a_0 \otimes a_1, a_0 \otimes a_1 \otimes a_2, a_1 \otimes a_2 \otimes a_3, a_2 \otimes a_3 \otimes a_0) \quad (5)$$

There are two pairs of operations that can be interchangeable:

$$(\theta, \sigma[k^j]) \text{ and } (\eta, \sigma[k^j]).$$

In each case, the key  $k^j$  is converted into an equivalent key  $\theta(k^j)$  or  $\eta(k^j)$ , respectively.

The  $J$ -th (full) round of MMB transformation can be represented by formula 6.

$$\rho[k^j](X) = \theta \circ \eta \circ \gamma \circ \sigma[k^j](X) = \theta \left( \eta \left( \gamma \left( \sigma[k^j](X) \right) \right) \right) \quad (6)$$

The complete process of encrypting plaintext  $P$  by the MMB algorithm is presented in formula 7.

$$\text{MMB}(P) = \sigma[k^6] \circ \rho[k^5] \circ \rho[k^4] \circ \rho[k^3] \circ \rho[k^2] \circ \rho[k^1] \circ \sigma[k^0](P) \quad (7)$$

The C # programming language was chosen to implement the MMB cipher because it has the necessary set of tools for working with ciphers, and based on experience.

Example of GUI is presented in Fig. 2.

By reading files directly as bit strings, application is capable of encrypting and decrypting data of any extension.

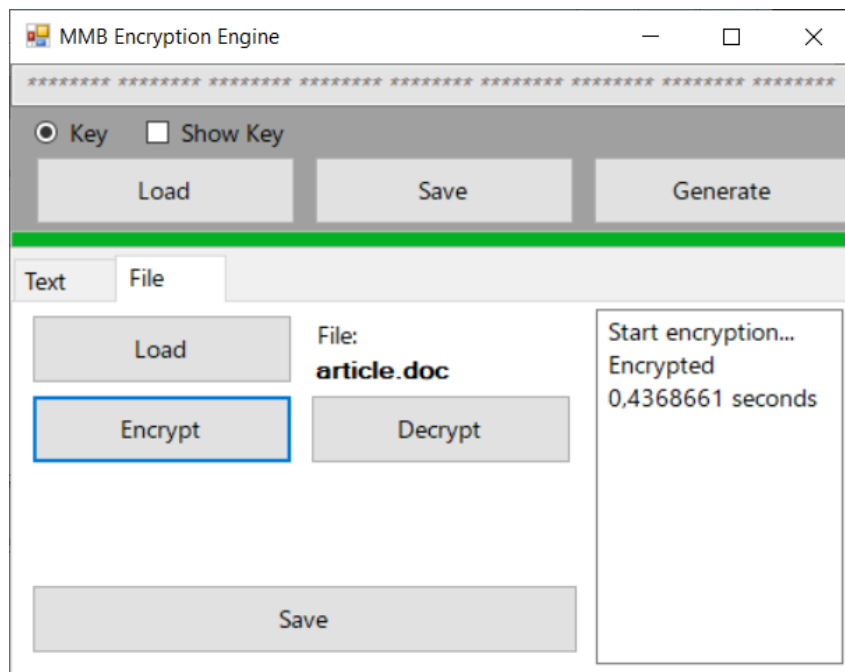


Fig. 2. GUI of a developed encryption system



A custom format was developed to create, store and utilize required cryptographic keys.

The program successfully utilizes the MMB algorithm to perform inverse encryption and decryption operations with all expected properties:

- reliability,
- robustness,
- retaining cryptographic strength;
- fast execution time.

### Conclusions

People tend to protect their secrets. The development of information technologies, their penetration into all spheres of human activity leads to the fact that the problems of information security are becoming more and more relevant every year - and at the same time more and more complex.

Therefore, information security is often considered as a set of informal recommendations for building

information security systems of one type or another. However, the practical methods of building protection systems are general laws that do not depend on the technical features of their implementation.

In the course of the work a number of sources were studied.

Presented mathematical formalization of algorithm, implementation of encryption algorithm, substantiation of reliability of use, application of algorithm.

Information security system, an application in C # to encrypt files of any extension using the block encryption algorithm MMB was developed, in particular:

- Analyzed subject area;
- The general architecture of the program was developed;
- The created program was tested;
- The program is successfully implemented.

### Reference

1. A. Joux, Algorithmic Cryptanalysis, United States: CRC Press, 2009.
2. Daemen, J., Van Linden, L., Govaerts, R., Vandewalle, J.: Propagation Properties of Multiplication Modulo  $2^n - 1$ . In: Proceedings of the 13th Symposium on Information Theory in the Benelux, Werkgemeenschap voor informatie- en Communicatietheorie, Enschede, The Netherlands, pp. 111–118 (1992)
3. Wang M., Nakahara J., Sun Y. (2009) Cryptanalysis of the Full MMB Block Cipher. In: Jacobson M.J., Rijmen V., Safavi-Naini R. (eds) Selected Areas in Cryptography. SAC 2009. Lecture Notes in Computer Science, vol 5867. Springer, Berlin, Heidelberg.
4. Bruce Schneier. Applied Cryptography (2nd Ed.): Protocols, Algorithms, and Source Code in C. John Wiley & Sons, Inc., USA, 1995.
5. Daemen, J., Govaerts, R., Vandewalle, J.: Block Ciphers Based on Modular Multiplication. In: Wolfowicz, W. (ed.) Proceedings of 3rd Symposium on State and Progress of Research in Cryptography, Fondazione Ugo Bordoni, pp. 80–89 (1993).
6. Lai, X.: On the Design and Security of Block Ciphers. In: Massey, J.L. (ed.) ETH Series in Information Processing, vol. 1. Hartung-Gorre Verlag, Konstanz (1995)
7. Daemen, J.: Cipher and Hash Function Design – Strategies based on Linear and Differential Cryptanalysis. PhD Thesis, Dept. Elektrotechniek, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium (1995)

Received (Надійшла) 13.07.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

### Аналіз та програмна реалізація модульного блокового шифру на основі множення

Г. Головка, В. Походун

**Анотація.** Людям властиво захищати свої секрети. Розвиток інформаційних технологій, їх проникнення у всі сфери людської діяльності призводить до того, що проблеми інформаційної безпеки з кожним роком стають все більш і більш актуальними – і водночас дедалі складнішими. Технології обробки інформації безперервно удосконалюються, а разом з ними змінюються і практичні методи забезпечення інформаційної безпеки. Безперечно, універсальних методів захисту не існує, багато в чому успіх при побудові механізмів безпеки для реальної системи залежатиме від її індивідуальних особливостей, облік яких погано піддається формалізації. Тому часто інформаційну безпеку розглядають як певну сукупність неформальних рекомендацій по побудові систем захисту інформації того або іншого типу. Однак за практичними прийомами побудови систем захисту лежать загальні закономірності, які не залежать від технічних особливостей їх реалізації. У цій статті висвітлюється постійно зростаюча потреба та важливість захисту інформації та безпеки даних у сучасних реаліях, представлені можливості шифрування даних за допомогою інструментів криптографії, особливо зосереджуючись на модульному блочному шифрі на основі множення. Огляд доступних джерел показав, що на момент написання цієї статті немає загальнодоступних програмних реалізацій алгоритму. Для досягнення мети створення такої реалізації була зібрана інформація для компіляції зрозумілого та адекватного математичного опису алгоритму. Представлена практична розробка системи захисту інформації, додаток на C # для шифрування файлів будь-якого розширення за допомогою алгоритму шифрування MMB.

**Ключові слова:** MMB, захист інформації, інформаційна безпека, криптографія, комплексні методи захисту інформації, шифрування.

С. П. Євсєєв, В. С. Хвостенко, К. О. Бондаренко

Харківський національний економічний університет імені С. Кузнеця, Харків, Україна

## РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗНИКА ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ НА ОСНОВІ ПОСТКВАНТОВИХ АЛГОРИТМІВ

**Анотація.** Розвиток сучасних технологій дозволяє суттєво розширити цифрові послуги. Для забезпечення послуг в Інтернет-просторі як правило використовуються протоколи цілісності SSL, TLS. Однак стрімкий розвиток обчислювальних технологій дозволяє зловмисникам не тільки модифікувати кіберзагрози, а також розробляти нові цільові загрози. Крім того поява повномасштабного квантового комп'ютера, як стверджують спеціалісти НІСТ США, дозволить зламувати симетричні та несиметричні криптосистеми на основі алгоритмів Гровера та Шора за поліноміальний час. В роботі пропонується модифікація протоколу TLS на основі використання, в якості алгоритма, який забезпечує стійкість протоколу TLS, використання постквантових алгоритмів на основі криптокодових конструкцій Мак-Еліса та Нідеррайтера на еліптичних кодах. Для дослідження властивостей запропонованого підходу використовується метод багатокритеріального аналізу, який дозволяє сформулювати комплексний показник якості обслуговування. Представлені дослідження підтверджують, що використання постквантових алгоритмів в якості алгоритму стійкості в протоколі TLS забезпечують підвищення ефективності на 30% при використанні в мережі на основі Gigabit Ethernet, та в 2 рази при використанні 10 Gb Ethernet.

**Ключові слова:** постквантовий період, протокол цілісності, крипто-кодові конструкції Нідеррайтера, еліптичні коди.

### Вступ

**Формулювання проблеми.** Розвиток сучасних технологій, обчислювальних систем суттєво поширив спектр цифрових послуг практично у всіх галузях людства. Це дозволило за останні п'ять років поширити використання кіберпростору щодо створення е-послуг, використання IoT-речей, значного поширення мобільних технологій "G", створення умов переходу на NGN-мережі, з одного боку. З іншого поширення кіберзагроз, щорічну зміну векторів загроз, придбання ними ознак гібридності та синергізму. В таких умовах висуваються більш жорсткі вимоги щодо систем забезпечення вірогідності та конфіденційності інформаційних потоків, що своєю чергою вимагає модифікації механізмів, що існують та/або розробку нових підходів щодо забезпечення необхідного рівня надійності та безпеки якості обслуговування та працездатності відповідних систем та мереж в цілому.

Однак з ростом обчислювальних можливостей зростає кількість кібератак на інформаційно-комунікаційні системи та мережі (ІКСМ), кіберфізичні системи (СФС) та системи IoT. Вектор загроз в кіберпросторі постійно змінюється, загрози набувають ознак гібридності на синергізму, що дозволяє формувати цільові атаки, створювати нові та/або модифікувати застарілі загрози. Для забезпечення безпеки як правило використовуються симетричні та несиметричні криптосистеми. Однак з появою повномасштабного квантового комп'ютера з використанням алгоритмів Гровера та Шора, вони можуть бути зламані, що може привести до хаосу в кіберпросторі. Тому на сьогоднішній час висуваються більш жорсткі вимоги щодо протоколів забезпечення послуг безпеки – конфіденційності та цілісності. Прикладом такого протоколу є протокол *Transport layer security (TLS)*, який забезпечує шляхом симетричних алгоритмів послуги безпеки – цілісність та автентичність. Таким чином в умовах постквантового періоду стає

актуальним науково-прикладним завданням створення нового або модифікація даного протоколу.

**Аналіз літератури.** Проведений аналіз показника якості обслуговування мережі визначає два підходи до його забезпечення [1–5]. Перший підхід, полягає в гарантованому забезпеченні користувачеві дотримання деякої числової величини показника якості обслуговування (забезпечення встановленого показника середньої пропускну здатності, показника часу затримки передачі і т.д.). Другий підхід полягає в пріоритетному обслуговуванні користувачів відповідно до встановленої ієрархії мережі. Таким чином, якість обслуговування залежить від ступеня привілейованості користувача або групи користувачів, до якої він належить. Для уповноважених користувачів інформаційно-комунікаційних систем та мереж (ІКСМ) якість обслуговування не гарантується, а гарантується тільки рівень їх привілеїв. Таким чином основними критеріями якості обслуговування є надійність та безпека, при цьому роль останнього критерію зростає з поширенням цифрових послуг та зростанням рівня обчислювальних технологій.

Проведений аналіз загроз [6–10] показав, що на сьогодні на перше місце виходять цільові загрози з характерними рисами гібридності та синергізму, які забезпечують зловмисникові емерджентні властивості.

Крім того, вектор загроз суттєво залежить від обчислювальних можливостей, і як показав аналіз [6–10] бурхливе зростання обчислювальних можливостей, можливість появи повномасштабного квантового комп'ютера дозволяє створювати не тільки гібридні загрози, а також цільові атаки, які мають ознаки синергізму та дозволяють зловмисникам домогтися своєї мети в найкоротші строки. В таких умовах необхідна модифікація сучасних протоколів забезпечення послуг, та/або розробка нових. В умовах постквантового періоду необхідно використовувати криптосистеми, які здатні протистояти алгоритмам Шора та Гровера. Одним з перспективних напрямків є алгоритми на основі криптокодових

конструкції (ККК) Мак-Еліса та Нідеррайтера. Так класична схема Мак-Еліса є претендентом на алгоритм постквантової криптографії, який проводиться в НІСТ США [11].

В роботах [6, 12] пропонується використовувати гібридні крипто-кодові конструкції, які дозволяють зменшити енергоємність при їх практичній реалізації та зберегти рівень стійкості.

Розглянемо формальний опис математичної моделі ГККК Нідеррайтера, яка задається сукупністю таких елементів [6]:

- множина відкритих текстів

$$M = \{M_1, M_2, \dots, M_{q^k}\},$$

де  $M_i = \{e_0, e_{h_1}, \dots, e_{h_k}, e_{e-1}\}$ ,  $\forall e \in GF(q)$ ;  $h_e$  – символи вектору помилки, що дорівнюють нулю,  $h/e = \frac{1}{2}e$ , тобто  $e_i=0$ ,  $\forall e_i \in h$ ;

- множина закритих текстів

$$S = \{S_0, S_1, \dots, S_r\},$$

де  $S_i = \{S_{X_0}^*, S_{h_1}^*, \dots, S_{h_j}^*, S_{X_r}^*\}$ ,  $\forall S_{X_r} \in GF(q)$ ;

– множина прямих відображень (на основі використання відкритого ключа – перевірконої матриці еліптичного коду (EC))

$$\Phi = \{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_r\},$$

де  $\Phi_i : M \rightarrow S_{r-h_e}$ ,  $i = 1, 2, \dots, e$ ;

– множина обернених відображень (на основі використання закритого (особистого) ключа – матриць маскування)

$$\Phi^{-1} = \{\Phi_1^{-1}, \Phi_2^{-1}, \dots, \Phi_r^{-1}\},$$

де  $\Phi_i^{-1} : S_{r-h_e} \rightarrow M$ ,  $i = 1, 2, \dots, e$ ;

– множина ключів, які параметризують прямі відображення (відкритий ключ уповноваженого користувача):

$$\begin{aligned} KU_{a_i} &= \{KU_{1a_i}, KU_{2a_i}, \dots, KU_{ra_i}\} = \\ &= \left\{ H_{X_{a_i}}^{EC1}, H_{X_{a_i}}^{EC2}, \dots, H_{X_{a_i}}^{ECr} \right\}, \end{aligned}$$

де  $H_{X_{a_i}}^{ECi}$  – перевірна  $r \times n$  матриця замаскованого

під випадковий код алгеброгеометричного блокового ( $n, k, d$ ) коду з елементами  $GF(q)$ , тобто

$\Phi_i : M \xrightarrow{KU_{i a_i}} S_{r-h_e}^*$ ,  $i = 1, 2, \dots, e$ ,  $a_i$  – набір коефіцієнтів многочлена кривої  $a_1 \dots a_6$ ,  $\forall a_i \in GF(q)$ , однозначно задає конкретний набір точок кривої з простору  $P^2$ ;

– множина ключів, які параметризують обернені відображення (особистий (закритий) ключ уповноваженого користувача):

$$\begin{aligned} KR &= \{KR_1, KR_2, \dots, KR_r\} = \\ &= \{\{X, P, D\}_1, \{X, P, D\}_2, \dots, \{X, P, D\}_r\}, \\ \{X, P, D\}_i &= \{X^i, P^i, D^i\}, \end{aligned}$$

де  $X^i$  – маскуюча невироджена випадково рівномірно сформована джерелом ключів  $k \times k$  матриця з елементами зі  $GF(q)$ ;  $P^i$  – перестановочна випадково рівномірно сформована джерелом ключів  $n \times n$  матриця з елементами з  $GF(q)$ ;  $D^i$  – діагональна сформована джерелом ключів матриця з елементами з  $GF(q)$ , тобто  $\Phi_i^{-1} : S_{r-h_e}^* \xrightarrow{KR_i} M$ ,  $i = 1, 2, \dots, s$ . Складність виконання оберненого відображення  $\Phi_i^{-1}$  без знання ключа  $K_i^* \in K^*$  пов'язана з розв'язанням теоретико-складної задачі декодування випадкового коду (коду загального положення).

- множина збиткових текстів CFT,

$$CFT = \{CFT_1, CFT_2, \dots, CFT_{q^k}\};$$

- множина збитків CHD,

$$CHD = \{CHD_1, CHD_2, \dots, CHD_{q^k}\};$$

– множина прямого нанесення збитку (на основі використання ключа –  $K_{MV2}^i$ , і алгоритму MV2)

$$E = \{E_{K_{MV2}^1}^1, E_{K_{MV2}^2}^2, \dots, \Phi_{K_{MV2}^s}^s\}, i = 1, 2, \dots, s;$$

–  $f(x)_i$  – флаг (збиток, CHD),  $C(x)_i$  – залишок (збитковий текст, CFT);  $f(x) = n - |C(x)|$ , якщо  $|C(x)| > r$ , де  $r$  – деякий параметр,  $r \in \mathbb{Z}_{q^m}$ ,  $0 < r < n$ ;

– множина відображень MV2  $F_n^r$ , що задає бієктивне відображення між множиною перестановок  $\{S_1, S_2, \dots, S_{2^n}\}$  і  $\#F_n^r$ ,  $\#F_n^r = \#\{(c, f)\} = 2^n!$ ;

– множина осмисленого тексту (на основі використання ключа –  $K_{MV2}^i$ , і алгоритму MV2)

$$E^{-1} = \{E_{K_{MV2}^1}^{-1}, E_{K_{MV2}^2}^{-1}, \dots, E_{K_{MV2}^s}^{-1}\},$$

де  $E_{K_{MV2}^i}^{-1} : \|f(x)_i\| + \|C(x)_i\| \rightarrow M$ ,  $i = 1, 2, \dots, s$ ;

$f(x)_i$  – флаг (збиток, CHD),  $C(x)_i$  – залишок (збитковий текст, CFT);  $f(x) = n - |C(x)|$ , якщо  $|C(x)| > r$ , де  $r$  – деякий параметр,  $r \in \mathbb{Z}_{q^m}$ .

Вихідними даними при описі розглянутої несиметричної крипто-кодової системи захисту інформації є:

– недвійковий рівноважний код над  $GF(q)$ , тобто множина послідовностей довжини  $n$  та ваги  $w(\epsilon_i)$ ;

– алгеброгеометричний блоковий ( $n, k, d$ ) код  $C$  над  $GF(q)$ , тобто така множина кодових слів  $C_i \in C$ , що виконується рівність  $C_i H^T = 0$ , де  $H$  – перевірна матриця алгеброгеометричного блокового коду;

–  $IV$  – вектор ініціалізації,  $IV = |h| = 1/2 h_e$  – елементи скорочення ( $h_e$  – символи вектору помилки, рівні нулю,  $|h| = 1/2e$ , тобто  $e_i = 0, \forall e_i \in h$ );

– маскуючи матричні відображення, задані множиною матриць  $\{X, P, D\}_i$ , де  $X$  – невідроджена  $k \times k$  матриця над  $GF(q)$ ;  $P$  – перестановочна  $n \times n$  матриця над  $GF(q)$  з одним ненульовим елементом в кожному рядку і в кожному стовпці матриці;  $D$  – діагональна  $n \times n$  матриця над  $GF(q)$  з ненульовими елементами на головній діагоналі;

–  $r$  – деякий параметр,

$$r \in_{\mathbb{R}} Z_{q^m}, Z_{q^m} = \{0, 1, \dots, 2^n - 1\};$$

–  $n$  – деякий параметр

$$n \in_{\mathbb{R}} Z_{q^n}, Z_{q^n} = \{1, \dots, 2^n\};$$

– множина відображень  $MV2 - F_n^r$ .

На основі рівноважного кодування формується закритий текст  $C_j \in C$  за введеним відкритим текстом  $M_i \in M$  і заданим ключем  $H_X^{ECu}$ ,  $u \in \{1, 2, \dots, s\}$ . Це здійснюється шляхом формування синдромної (в термінах завадостійкого кодування) послідовності  $S_{X_j}$ , що відповідає рівноважній послідовності

$$M_i = e = \{e_0, e_1, \dots, e_{n-1}\};$$

$$S_{X_j} = \phi_u(M_i, H_X^{ECu}) = M_i \times (H_X^{ECu})^T,$$

причому вага Гемінга (кількість ненульових елементів) вектору  $e$  не перевищує виправної здатності використовуваного алгебраїчного блокового  $(n, k, d)$  коду:  $\forall i: 0 \leq w(M_i) \leq t = \lfloor \frac{d-1}{2} \rfloor$ .

Потужність множин  $M$  та  $C$  визначається допустимим спектром ваг  $w(M_i)$ , тобто в загальному випадку (для всіх допустимих значень  $w(M_i)$ ) маємо:

$$m = \sum_{i=0}^t (q-1)^i \times C_n^i, \text{ де } C_n^i - \text{біноміальний коефіцієнт, } C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}.$$

Найбільш доцільно величину  $w(M_i)$  вибирати відповідно до необхідного значенням рівня безпеки.

Тоді для  $w(M_i) = const = w(e)$  маємо:

$$m = (q-1)^{w(e)} \times C_n^{w(e)},$$

а послідовність  $M_i = \{e_0, e_1, \dots, e_{n-1}\}$  з множини  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$  формується як результат деякого відображення  $\psi$ , реалізованого шляхом надлишкового кодування недвійковими рівноважними кодами ненадлишкових інформаційних послідовностей.

Сформований закритий текст  $C_j \in C$  однозначно відповідає вектору  $M_i = \{e_0, e_1, \dots, e_{n-1}\}$ .

Сформуємо вектор ініціалізації  $IV = EC - h_j$ , де  $h_j$  – інформаційні символи, що дорівнюють нулю,  $|h| = k/2$ , тобто  $I_i = 0, \forall I_i \in h$ . Формування укороченого вектору помилки  $e_i = e(A) - IV$ .

Відкритий ключ формується шляхом множення перевірконої матриці алгеброгеометричного коду на матриці маскування:

$$H_X^{ECu} = X^u \cdot H \cdot P^u \cdot D^u, u \in \{1, 2, \dots, s\},$$

де  $H^{EC}$  – перевірна  $n \times (n-k)$  матриця алгеброгеометричного блокового  $(n, k, d)$  коду з елементами з  $GF(q)$ .

В алгоритм  $MV2$  надходить синдромна послідовність:

$$S_{r-h_e}^* = (e_n - h_e) \times H_X^{ECT}.$$

В  $MV2$  синдромна послідовність  $S_{r-h_e}^*$  перетворюється на залишок і флаг:

$$E_{KMV2} : S_{r-h_e}^* \rightarrow \|f(x)_i\| + \|C(x)_i\|.$$

В канал зв'язку поступає  $\|f(x)_i\|$  та  $\|C(x)_i\|$ , при цьому передача може здійснюватися як за одним, так і по двох незалежних каналах.

На стороні прийому уповноважений користувач, який знає правило нанесення збитку  $F_n^r$ , маскування (набір матриць  $\{X, P, D\}_u = \{X^u, P^u, D^u\}$ ) і вектору ініціалізації (кількість і місця нульових символів вектору помилки):

$$E_{KMV2}^{-1} : \|f(x)_i\| + \|C(x)_i\| \rightarrow S_{r-h_e}^*,$$

формує кодову послідовність як одне (будь-яке) з можливих рішень рівняння:  $S_{r-h_e}^* = c_{X_i}^* \cdot H_{X_j}^T$ ,

тобто знаходить такий вектор  $c_{X_i}^*$ , який розкладається на суму:  $c_{X_i}^* = c_{X_i} + M_i$ , де  $c_{X_i}$  – одне (будь-яке) з можливих кодових слів замаскованого коду з перевірконої матрицею  $H_{X_j}^T$ , тобто  $c_{X_i} \times H_{X_j}^T = 0$ .

Далі уповноважений користувач, використовуючи набір матриць  $\{X, P, D\}_u = \{X^u, P^u, D^u\}$ , формує вектор:

$$\bar{c}^* = c_X^* \cdot (D^u)^{-1} \cdot (P^u)^{-1},$$

тобто демаскує кодову послідовність  $c_{X_i}^*$ .

Після підстановки отримаємо рівність:

$$\begin{aligned} \bar{c}^* &= c_X^* \cdot (D^u)^{-1} \cdot (P^u)^{-1} = \\ &= (c_{X_i} + M_i) \cdot (D^u)^{-1} \cdot (P^u)^{-1} = \end{aligned}$$

$$= c_{X_i} \cdot (D^u)^{-1} \cdot (P^u)^{-1} + M_i \cdot (D^u)^{-1} \cdot (P^u)^{-1}.$$

Уповноважений користувач, який сформував вектор, має можливість застосувати швидкий (поліноміальної складності) алгоритм завадостійкого декодування і сформувати таким чином вектор

$$\bar{c}^* = c_X^* \cdot (D^u)^{-1} \cdot (P^u)^{-1}$$

та вектор

$$M_i^u = M_i \cdot (D^u)^{-1} \cdot (P^u)^{-1}.$$

Для відновлення інформаційної рівноважної послідовності  $M_i$  достатньо знову помножити вектор  $M_i^u$  на матриці маскування  $D^u$  та  $P^u$ , але в іншому порядку:

$$\begin{aligned} M_i &= M_i^u \cdot P^u \cdot D^u = \\ &= M_i \cdot (D^u)^{-1} \cdot (P^u)^{-1} \cdot P^u \cdot D^u = M_i. \end{aligned}$$

Формування шуканого вектору помилки  $e$ :

$$M = M_i + IV.$$

Аналіз практичної реалізації алгоритмів шифрування / розшифрування в ГККК Нідеррайтера показує, що при формуванні криптограми (синдрому) після формування вектору помилки алгоритмом рівноважного кодування на основі вектору ініціалізації (формується ПВП і передається закритими каналами або вектор шифрується алгоритмом MV2 і передається двома незалежними відкритими каналами) проводиться скорочення –  $h_e$  (символи вектору помилки, що дорівнюють нулю),  $|h| = 1/2e$ , тобто  $e_i = 0, \forall e_i \in h$ . При розшифруванні криптограми (після отримання вектору помилки, перед викорис-

танням алгоритму рівноважного кодування) для отримання інформації вводяться “нульові” символи укорочення.

### Розроблення протоколу TLS з використанням постквантових алгоритмів на основі крипто-кодових конструкцій

В поточній версії протоколу доступні такі алгоритми [13]:

- для обміну ключами і перевірки їх справжності використовують комбінації алгоритмів: RSA (асиметричний шифр), Diffie-Hellman (безпечний обмін ключами), DSA (алгоритм цифрового підпису) і алгоритми технології Fortezza;
- для симетричного шифрування: RC2, RC4, IDEA, DES, Triple DES або AES;
- для геш-функцій: MD5 або SHA.

Однак проведений аналіз [14, 15] сучасних загроз показав, що вони набувають ознак гібридності та синергізму. Крім цього поява повномасштабного квантового комп'ютера суттєво зменшує стійкість алгоритмів, які використовуються. Крипто-кодові конструкції Мак-Еліса та Нідеррайтера дозволяють забезпечити необхідний рівень стійкості, оперативності та достовірності. Це підтверджується проведеними попередніми дослідженнями [6, 9, 12].

На рис. 1 запропонована схема використання крипто-кодових конструкцій в протоколі TLS.

Пропонується використовувати ККК Мак-Еліса для забезпечення безпеки передачі сертифікатів (їх обміну між користувачем і сервером), а для забезпечення безпеки передачі повідомлень і запитів – використовувати крипто-кодові конструкції Нідеррайтера. Такий підхід забезпечить необхідний рівень безпеки і достовірності в умовах сучасних кіберзагроз та бурхливого зростання обчислювальних ресурсів.

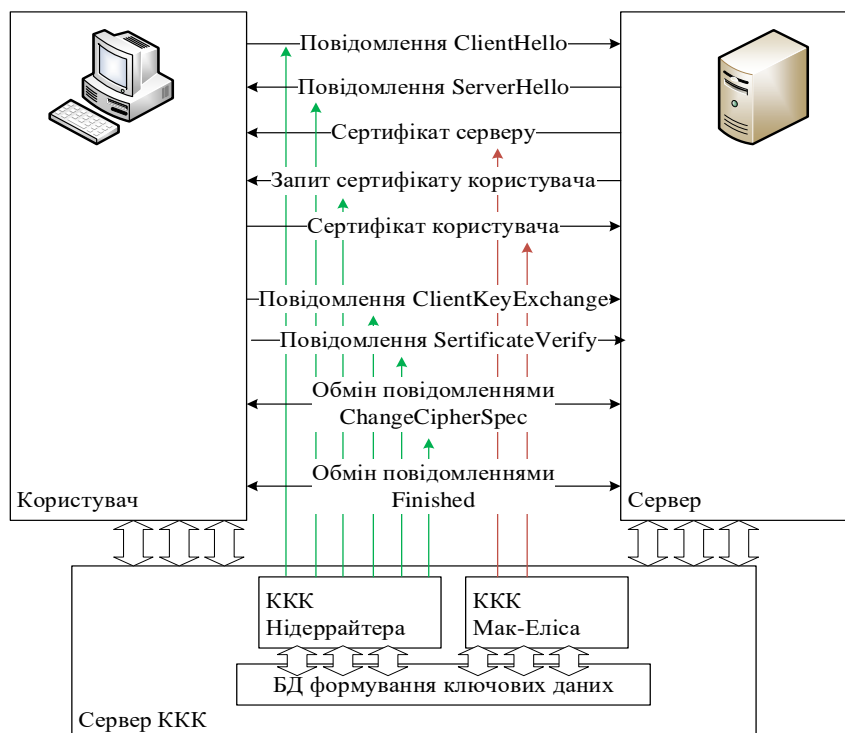


Рис. 1. Структурна схема протоколу TLS з використанням крипто-кодових конструкцій

На рис. 2 та в табл. 1 наведені результати досліджень часових витрат на забезпечення необхідного рівня безпеки в протоколі TLS.

Аналіз рис. 2 показав, що для обміну даними в протоколі TLS забезпечує необхідний рівень опера-

тивності, при цьому забезпечуючи і необхідний рівень безпеки.

Використання запропонованої модифікації протоколу забезпечить його використання в умовах повномасштабного квантового комп'ютера.

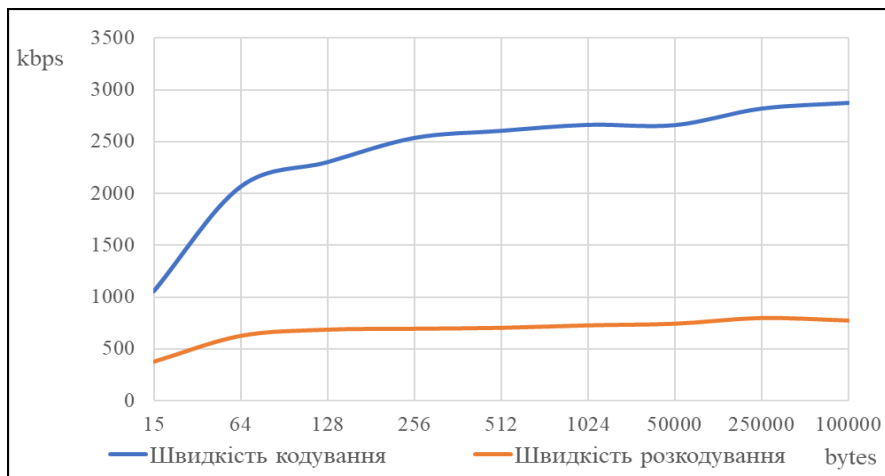


Рис. 2. Оцінка витрат часу на виконання шифрування / розшифрування ККК

Таблиця 1 – Оцінка витрат часу на виконання шифрування / розшифрування крипто-кодових конструкцій

Кількість інформації, байт	Швидкість кодування, кбайт/с	Швидкість розкодування, кбайт/с
15	1052	373
64	2063	624
128	2301	684
256	2535	693
512	2604	702
1024	2662	726
50000	2659	742
250000	2819	797
100000	2874	773

### Розробка комплексного показника якості обслуговування на основі крипто-кодових конструкцій

Для оцінки комплексного показника ефективності були розроблені опорні таблиці, що дозволяють виділити діапазони зміни необхідних параметрів і визначити їх в умовних балах. Цей простий метод дозволяє отримати досить адекватні результати оцінки, і крім того, об'єднати їх з результатами точних розрахунків за окремими конкретними параметрами. В опорних табл. 2–9 наведені параметри систем передачі даних, які враховуються в інтегральному показнику функціональної ефективності IP-мережі [16].

Таким чином, на основі моделі багатофакторного аналізу можливо описати абсолютно різні параметри, які в інший спосіб аналітично об'єднати практично неможливо.

Таблиця 2 – Вартість розгортання мережі

Бали	Опис параметру
1	Дуже висока вартість
2	Висока вартість
3	Середня вартість
4	Низька вартість
5	Дуже низька вартість

Таблиця 3 – Швидкість передачі даних

Бали	Опис параметру
1	Мала (10Мб/с)
2	Середня (100 Мб/с)
3	Висока (1Гб/с)
4	Дуже висока (10Гб/с)
5	Надзвичайно висока (40 Гб/с)

Таблиця 4 – Ймовірність доставки пакету

Бали	Опис параметру
1	Мала (> 0)
2	Середня (0.95)
3	Висока (0.97546)
4	Дуже висока (0.999999)

Таблиця 9 – Рівень безпеки

Бали	Опис параметру
1	критичний
2	Малий
3	середній
4	високий

Таблиця 6 – Затримка пакету

Бали	Опис параметру
1	Велика
2	Середня
3	Мала

Таблиця 5 – Час доставки пакету

Бали	Опис параметру
1	Дуже великий (1875 с)
2	Великий
3	Середній
4	Малий (0.006 с)
5	Дуже малий (0.0003 с)

Таблиця 7 – Продуктивність мережі

Бали	Опис параметру
1	Мала
2	Середня
3	Висока

Таблиця 8 – Рівень загроз

Бали	Опис параметру
1	Критичний
2	високий
3	середній
4	малий
5	дуже малий

Для порівняння існуючих технологій передачі даних було відібрано наступні: пакетна комутація за стандартами глобальних обчислювальних мереж

(ГОМ): *Gigabit, 10 Gb, 40 Gb Ethernet*. Порівняльні характеристики зазначених технологій показані в табл. 10, 11.

Таблиця 10 – Порівняльна характеристика протоколу Ethernet

Технологія ГОМ	Вартість	Швидкість передачі даних, Мбіт/с	Довжина пакету, біт	Ймовірність правильної доставки пакету, $P_{пл}$	Час доставки пакету, $t_d$ , с
<i>Gigabit Ethernet</i>	висока	1000	1518	0.99999	0.006
<i>10 GbE</i>	висока	10 000	1518	0.99999	0.006
<i>40GbE</i>	висока	40 000	1518	0.99999	0.006

Таблиця 11 – Узагальнена ефективність мереж передачі даних

Технологія з використанням TLS	Умовні бали										Відносна ефективність, %
	група								узагальнений індекс ефективності		
	1	2	3	4	5	6	7	8			
<i>Gigabit Ethernet</i>	3	3	3	1	2	1	1	1	1	54	10,6
<i>10 Gb Ethernet</i>	2	4	3	2	2	1	1	1	1	96	18,8
<i>40 Gb Ethernet</i>	1	5	3	3	2	1	2	2	2	360	70,6
Всього:										510	100
Технологія з використанням модифікованого TLS											
<i>Gigabit Ethernet</i>	3	3	4	5	3	3	4	4	4	25920	40,9
<i>10 Gb Ethernet</i>	2	4	4	5	3	3	4	4	4	23040	36,4
<i>40 Gb Ethernet</i>	1	5	4	5	3	3	4	4	4	14400	22,7
Всього:										63360	100

Використовуючи дані з табл. 2–10, отримуємо таблицю узагальненої ефективності мереж передачі даних, де відібрані показники вже подано в умовних балах в діапазоні від 1 до 5. Крім цього враховуються показники не тільки надійності, а також і безпеки в умовах цільових атак з ознаками синергізму та гібридності, що дозволяє отримати комплексний показник якості обслуговування. В табл. 11 група: 1 – вартість розгортання мережі; 2 – швидкість передачі даних; 3 – ймовірність доставки пакету; 4 – час доставки пакету; 5 – затримка пакету; 6 – продуктивність мережі; 7 – рівень загроз; 8 – рівень безпеки.

Отримані результати використання відповідних технологій кіберпростору з використанням протоко-

лу TLS, та з використанням запропонованих моделей та методів його модифікації у табл. 11 свідчать, що використання запропонованих рішень не тільки збільшує показник рівня безпеки, а також дозволяє забезпечити можливість передачі даних з прямим виправленням помилок за рахунок використання методів завадостійкого кодування в крипто-кодової конструкції Нідеррайтера, що дозволяє підвищити рівень якості обслуговування до максимальних значень безпеки та надійності при використанні технології *Gigabit Ethernet*, та *10 Gb Ethernet*.

Таким чином, приведені результати свідчать про необхідність використання нових, або модифікованих/інтегрованих механізмів забезпечення не-

обхідних рівнів надійності та безпеки інформації в інформаційних системах та кіберпросторі.

### Висновки

1. Запропонована схема модифікованого протоколу TLS на основі модифікованих (гібридних) крипто-кодових конструкцій забезпечує необхідний рівень стійкості до сучасних загроз постквантового періоду. Проведені дослідження підтверджують, що застосування *MEC (EC)* забезпечує швидкість на рівні швидкості криптоперетворень симетричних криптоалгоритмів, доказову криптостійкість на основі теоретико-складності задачі декодування випадкового коду (забезпечується  $10^{30} - 10^{35}$  групових операцій), і достовірність на основі використання укороченого алгеброгеометричного коду (забез-

печується  $P_{ном}=10^{-9}-10^{-12}$ ). Для подальшого зменшення потужності алфавіту (поля Галуа до  $GF(2^4-2^6)$ ) пропонується використовувати системи на збиткових кодах, що дозволяють одночасно формувати багатоканальні криптосистеми.

2. Удосконалений метод оцінки якості обслуговування інформаційних систем на основі багатокритеріальної оцінки, що дозволило, на відміну від існуючих виділити діапазони зміни параметрів критеріїв надійності та безпеки визначити їх в умовних балах. Запропонований модифікований протокол TLS на ККК Нідеррайтера дозволяє збільшити відносну ефективність в мережі на основі *Gigabit Ethernet* з 10,6% до 40,9%, а на основі *10 Gb Ethernet* з 18,8% до 36,4%, що свідчить про ефективність запропонованого підходу.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Яновский Г. Г. Качество обслуживания в сетях IP / Г.Г. Яновский // Вестник связи. – 2008. – №1. – С. 1 – 16.
2. ISO 9000:2005. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:9000:ed-3:v1:ru>.
3. Рекомендация МСЭ E.800. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-E.800-200809](https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-E.800-200809). Дата звернення: 20.05.2021.
4. Рекомендация МСЭ X.134// [Электронный ресурс]. URL: [www.itu.int/rec/T-REC-X.134](http://www.itu.int/rec/T-REC-X.134). Дата звернення: 20.05.2021.
5. Рекомендация МСЭ-T E.802 Принципы и методики определения и применения параметров QoS [Электронный ресурс]. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-E.802-200702-1/es>. Дата звернення: 20.05.2021.
6. Edited by Serhii Yevseiev, Volodymyr Ponomarenko, Oleksandr Laptiev, Oleksandr Milov. Synergy of building cybersecurity systems: monograph / S. Yevseiev, V. Ponomarenko, O. Laptiev, O. Milov and others. – Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 2021. – 188 p.
7. Yevseiev and other. Development of conception for building a critical infrastructure facilities security system. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. 3/9 (111). P. 63–83.
8. O. Shmatko and other. Development of methodological foundations for designing a classifier of threats to cyberphysical systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774 3/9 ( 105 ) 2020. p. 6–19.
9. Tsyhanenko. Development of digital signature algorithm based on the Niederreiter crypto-code system / O. Tsyhanenko // Information Processing Systems, 2020. – Issue 3 (162) – С. 86 –94.
10. Р. В. Гришук, та Ю. Г. Даник. Основи кібернетичної безпеки: Монографія /; за заг. ред. Ю. Г. Даника. Житомир: ЖНАЕУ, 2016.
11. Round 3 Submissions - Post-Quantum Cryptography. URL: <https://csrc.nist.gov/Projects/post-quantum-cryptography/round-3-submissions>
12. Development of Niederreiter hybrid crypto-code structure on flawed codes / S. Yevseiev, O. Tsyhanenko, A. Gavrilova, V. Guzhva, O. Milov, V. Moskalenko, I. Opriskyu, O. Roma, B. Tomashevsky, O. Shmatko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2019. – № 1/9 (97). – p. 27–38
13. Описание протоколов SSL/TLS. URL: [www.cryptopro.ru/sites/default/files/docs/TLS\\_description.pdf](http://www.cryptopro.ru/sites/default/files/docs/TLS_description.pdf)
14. Р. В. Гришук, та Ю. Г. Даник, “Синергія інформаційних та кібернетичних дій”, Труды університету. НУОУ, № 6 (127), с. 132–143. 2014.
15. Р. В. Гришук, “Синтез систем інформаційної безпеки за заданими властивостями”, Вісник національного університету “Львівська політехніка”. Серія : Автоматика, вимірювання та керування : зб. наук. пр., ЛП, № 74, с. 271 –276, 2012.
16. С. П. Євсєєв, С. Е. Остапов, Х. Н. Рзаєв, та В. І. Ніколасенко, “Оцінка обміну даними в глобальних обчислювальних мережах на основі комплексного показника якості обслуговування мережі”, Науковий журнал Радіоелектроніка, інформатика, управління, № 1(40), с. 115 – 128, 2017.

Received (Надійшла) 28.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

### Development of a comprehensive service quality indicator based on postquantum algorithms

Serhii Yevseiev, Vladyslav Khvostenko, Kyrylo Bondarenko

**Abstract.** The development of modern technologies allows expanding digital services significantly. SSL and TLS integrity protocols are commonly used to provide services in the Internet. However, the rapid development of computing technologies allows attackers not only to modify cyber threats, but also to develop new-targeted threats. In addition, the advent of a full-scale quantum computer, according to US NIST experts, will break symmetric and asymmetric cryptosystems based on Grover's and Shor's algorithms in polynomial time. The paper proposes a modification of the TLS protocol based on the use, as an algorithm that ensures the stability of the TLS protocol, the use of post-quantum algorithms based on crypto-code constructions of McEliece and Niederreiter on elliptical codes. To study the properties of the proposed approach, the method of multicriteria analysis is used, which allows to form a comprehensive indicator of service quality. The presented studies confirm that the use of post-quantum algorithms as a stability algorithm in the TLS protocol provides a 30% increase in efficiency when used in a network based on Gigabit Ethernet, and 2 times when using 10 Gb Ethernet.

**Keywords:** post-quantum period, integrity protocol, Niederreiter crypto-code constructions, elliptical codes.



A. Kapiton<sup>1</sup>, R. Baranenko<sup>2</sup>, D. Tyshchenko<sup>3</sup>, O. Diachenko<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

<sup>2</sup>Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine

<sup>3</sup>Kyiv National University of Trade and Economics, Kiev, Ukraine

<sup>4</sup>Mariupol State University, Mariupol, Ukraine

## PROSPECTS FOR THE CYBERSPACE DEVELOPMENT AND ITS SOCIO-PSYCHOLOGICAL CONSEQUENCES

**Abstract.** The article is devoted to the analysis of issues and research of the influence of social and psychological factors that influence the formation of Internet-dependent behavior of the individual in terms of increasing the role of cyberspace in today's conditions. The article examines the problems of interpersonal communication in the digital space, which leads to the virtualization of the living space of modern man, causing a certain specific danger, special needs and dependencies. The results of scientific research in this area are analyzed, namely those devoted to the impact of information technology on humans, based on the specifics of digitalization of educational space, in terms of modern development of the information environment of the world. The authors explored the main types of activities on the Internet: cognitive, game and communicative, which are directly responsible for specific personality changes.

**Keywords:** information technologies, cyberspace, Internet gaming disorders, virtualization, gaming.

### Introduction

The purpose of this work is to identify the main problems of the Internet on modern society. The task of this work is to solve and eliminate as effectively as possible the pressure of information technology on humanity. In recent decades, new information technologies using personal computers and telecommunications have been developing rapidly. Information technology is a process that uses a set of tools and methods for collecting, processing and transmitting primary information to obtain information of new quality.

**Analysis of recent research and publications.** It is necessary to analyze the destructive processes occurring in the virtual socializing Internet environment, reflect the research data on the impact of virtual reality on the processes of socialization of youth, the factors of Internet dependence and proposals for its prevention. According to O. Evzikova, information is not matter and not energy, but something else. E. Borodina, O. Shefer, S. Alyoshin introduces the concept of information as a dynamic image of the world around us, which is formed in the flow of sensations integrated by a living being. The process of accumulation of information was formed during the long history of civilization, while improving the methods of its transmission - from rock drawings to the emergence of alphabetic writing [1, 2, 5, 6].

In today's world, we see that the most powerful source of information is the Internet and the so-called cyberspace created by it. The Internet in its development has passed the way from the professional sphere of communication of programmers to the sphere of free communication, realizes wider in comparison with professional personal interests. The Internet today is not just a network of interconnected computers, but a community of people who use the Internet. In this regard, the scientific literature claims the term "psychology of the Internet." Research in this area, namely on the impact of information technology on humans, mainly psychological aspects, is conducted by scientists from around the world.

### Main part

When the development of the Internet was just beginning, everyone was interested in the fact that the useful can be extracted from the ability to communicate using a computer. However, it is time to look at what is happening as a social process, as each individual through the Internet can convey their thoughts to a huge number of people who together are trying to transform reality. The WWW, as the Internet is called, has already connected millions of users with invisible electronic threads. Today we do not know how the individual and social behavior of a person will be affected by communication, in which millions of people are involved, but we can say with confidence that the impact will be, and will be noticeable. For example, by participating in the life of cyberspace, social minorities find strength and influence, various movements are organized, and third world countries make huge information leaps forward. Therefore, all over the world now attach great importance to those projects that involve the organization of access of the general population to the Internet.

There are three main types of activities on the Internet which correspond to personality changes: cognitive; gaming; communicative [1, 3, 6]. In this sense, the possibilities of the Internet are not limited, so it is rightly called a springboard into the future. Indeed, on the one hand, today it is the world's richest treasury of knowledge, which is the property of all mankind, but on the other - the Internet has accumulated a huge amount of negative information that also affects people. It is necessary to analyze the destructive processes occurring in the virtual socializing Internet environment, reflect the research data on the impact of virtual reality on the processes of socialization of youth, the factors of Internet dependence, proposals for its prevention.

Modern man today is no longer a classic Homo Sapiens, but a much virtualized bio-socio-electronic subject, which directs its activity not only in the social, spiritual sphere, the environment and the world of culture, but also in a new virtual environment that forms its

new opportunities and needs. The living space of the individual, a significant place in which is work, communication, education, creativity, leisure, is supplemented by new opportunities and forms. Due to virtualization, it first doubles when a person combines active life in two dimensions (digital and real), and then there is a gradual shift towards a virtual lifestyle (which requires less effort and is controlled by the individual). Significant changes associated with the introduction of information technology in the surrounding modern world, in its communication, education, work, leisure and lead to the fact that in the field of values there are new guidelines: information, mobility, accessibility, speed of interaction, etc. In search of sources of communication, creativity, knowledge, self-expression, people are increasingly turning not to the real but to the virtual sphere, which already dominates his consciousness and life in a number of parameters.

Thus, the development of the Internet and the field of high technology pose many problems, one of which, in my opinion, is the problem of loneliness and alienation. Internet gambling addiction is currently classified as a mental disorder only in the context of gaming (as a gambling addiction), Internet addiction as a mental disorder is qualified by most researchers, although it raises significant concerns. Potential addicts belonging to the risk group are usually people prone to other types of addiction, prone to depression, phobias, as well as difficulties in the social sphere, in the implementation of self-development. The transition of involvement in the form of addiction is enhanced in the presence of existential, sociocultural and psychological factors. At the same time, the formation of Internet gambling addiction is a consequence of the development of consumer society, advertising of gaming and media products, imposed by producers of information products and resource needs. Traditionally, there are “alienation as a universal characteristic of human existence, as a characteristic of the psychological state of man, and finally as a characteristic of a certain social state, when a person's creative activity is limited and he is enslaved by the product of

his own activity. Different grounds for alienation cause different forms of its manifestation, so in this sense, alienation is multifaceted.

This suggests that the solution to this problem lies in different areas - both legal, regulatory activities of sellers of Internet services and gaming products, and social, cultural, interpersonal. The phenomenon of alienation has existed at all times, it is not an absolute affiliation of past years [3].

First of all, this problem came into the field of view of physicians and psychologists, because the consequences of the superiority of virtual communication and computer games in some cases led to devastating effects on the individual. Thus, among medical professionals, the approach has been established that a person, spending all his free time playing computer games, feels pleasure similar to drugs. We consider, Internet addiction a new danger for a person, like a drug, the manifestation of which is expressed both in increased arousal and in the deepening of subsequent depressive states of the user. A new type of dependence is manifested in the desire for constant presence in the virtual world (playful or communicative), neglect of real social ties, weakening of cognitive, creative activity, increasing passive. Social factors in the formation of addictions are also essential: it is the desire to communicate with others, socialization, which in a high-tech society moves into the information space. If a modern young person does not accept these conditions, it inevitably finds itself in isolation, as most young people belong to the Internet generation, play video games, communicate on social networks. Virtual communication due to distance allows a person to be simultaneously in several places (physically he is present in one place, mentally - spends time in another), being in unfavorable social conditions, feeling his need for others, difficulties in real communication, a person looking for interaction with virtual friends and partners, formed in the modern generation in a new social need. Most gamers and addicts have problems with real communication, although this is not a general rule (Fig. 1) [1].

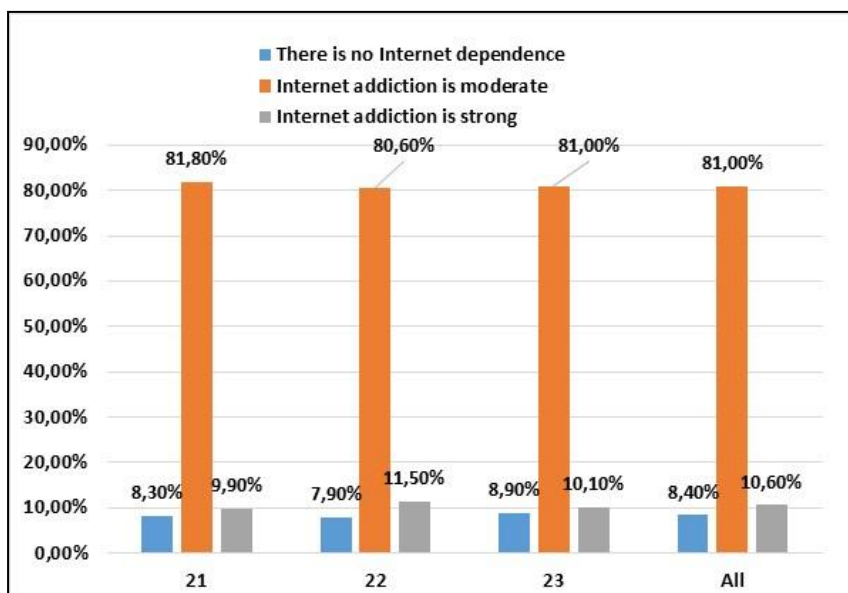


Fig. 1. Internet dependence rate (by age,%)

In modern conditions, hyperactive and overly communicative people find realization for themselves also in virtual interaction, gathering a large number of "friends", "followers", readers of their blogs, messages in networks. However, the movement of attention, interests, circles of acquaintances and friends in virtual communities gradually weakens real social ties, its social circle is reduced, it becomes more closed and prefers real meetings with people - Internet sessions or games. Types of modern Internet addiction are becoming more diverse, they are accompanied by online shopping, viewing a variety of videos and photos, which take up more and more time, displacing book reading, self-education, creativity, real communication. However, these processes are not spontaneous, inherent in the individual; on the contrary, they are formed purposefully, as imposed on human needs by various advertising firms, agencies for the production and sale of video products. Games and media products are a profitable commodity in the modern market, and their promotion is aimed at the formation of modern man's interest, satisfaction, and then the need for them. In this case, we are dealing with the economic aspect of the problem of forming an Internet gambling addiction. Society is subject to the paradigm of selling various services and goods that are redundant for man, and in order to convince him of the need to purchase them, you need information "tricks": advertising "cookies", banners, etc., which are crowded with social networks, games portals, mail, educational and other sites. The video game business (including game consoles and gadgets) focuses its

efforts on creating an imposed need for games, which for people from the above risk groups can turn into addictions that require treatment.

However, it is important for society to realize this problem as a threat to the individual (because in most countries still prevails neglect of this problem) and the creation of a legal framework governing the use of advertising in the information space, its gradual regulation to protect people from manipulative influence not only with physical threats, but also with threats to culture, freedom, intelligence, etc.

### Conclusions

Thus, the problems of virtualization of human living space, the formation of the information society, a powerful sector of services and entertainment are becoming objective factors in the development of new addictions and lack of freedom of modern man. The most significant subjective factors are related to psychological, existential, personal characteristics, the objective factors include social, cultural and economic. This means that the solution to emerging problems can not lie only in the field of medicine and psychology and even in the field of education. It is unlikely to be able to resist the efforts of the business community of the information world, or it will be local and private. That is why it is advisable to carefully study this problem in order to further analyze it and improve ways to eliminate its negative impact on the development of personality in terms of increasing digitalization of all areas of today.

### REFERENCES

1. Інтернет-залежність української молоді: сучасний стан проблеми URL: <https://commons.com.ua/uk/internet-zalezhnist/>
2. Evzikova, O. Google Education Tools URL: <http://teachtech.ru/instrumenty-veb-2-0/instrumenty-google-dlya-obrazovaniya.html>
3. Hafiak, A. (2019). Problems of professional competence of future specialists on information and communication technologies in universities. Series: Education And Pedagogy, 10 (2), 15-18.
4. Інтернет-залежність: як діагностувати та позбутися? URL: <https://thepoint.rabota.ua/internet-zalezhnist-yak-diahnostuvaty-ta-pozbutysya/>
5. Mozhaev, O., Kuchuk, H., Kuchuk, N., Mykhailo, M., Lohvynenko, M. (2017), "Multiservice network security metric", 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies, AICT 2017 – Proceedings, pp. 133-136, DOI: <https://doi.org/10.1109/AIACT.2017.8020083>
6. Hafiak, A., Borodina, E., Shefer, O., Alyoshin, S. (2019). The information technology and mobile applications appliance for the future specialists preparation in higher education institutions. Control, Navigation and Communication Systems, 3 (55), 76–79.

Received (Надійшла) 12.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.08.2021

### Перспективи розвитку кіберпростору та його соціально-психологічні наслідки

А. Капітон, Р. Бараненко, Д. Тищенко, О. Дяченко

**Анотація.** Стаття присвячена аналізу проблематики та дослідженню впливу соціальних і психологічних факторів, які впливають на формування Інтернет-залежної поведінки особистості в умовах підвищення значення ролі кіберпростору в умовах сьогодення. В статті досліджено проблеми міжособистісної комунікації в цифровому просторі, що призводить до віртуалізації життєвого простору сучасної людини, викликаючи певну специфічну небезпеку, особливі потреби і залежності. Проаналізовано результати наукових досліджень в цій області, а саме ті, що присвячено темі впливу інформаційних технологій на людину, спираючись на специфіку цифровізації освітнього простору, з точки зору сучасного розвитку інформаційного середовища світу. Авторами досліджено основні різновиди діяльності в інтернет: пізнавальна, ігрова та комунікативна, які безпосередньо відповідають за конкретні зміни особистості.

**Ключові слова:** інформаційні технології, кіберпростір, Інтернет-ігрові розлади, віртуалізація, геймерство.

Н. Г. Кучук, А. П. Шиман, А. М. Філоненко, С. С. Бульба

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

## РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РЕСУРСІВ САМОВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ

**Анотація.** В статті розглядаються самовідновлювальні комп'ютерні системи (СВКС). Предметом досліджень є методи розрахунку ефективності використання обчислювальних ресурсів у комп'ютерних системах. Мета статті полягає у розробленні підходу до розрахунку ефективності використання обчислювальних ресурсів комп'ютерної системи, орієнтованого на особливості самовідновлювальних структур. Використаними методами є методи дослідження систем масового обслуговування. Отримані такі результати: формалізовано завдання розрахунку ефективності використання обчислювальних ресурсів; розроблено алгоритм пошуку прийнятних значень ступеню завантаженості пучка каналів компонент; запропоновано спосіб знаходження оптимального інформаційного навантаження компонентів СВКС за комплексним показником. **Висновки.** Розроблено метод розрахунку ефективності використання обчислювальних ресурсів комп'ютерної системи, орієнтованого на особливості самовідновлювальних структур. Метод дозволяє при синтезі інформаційної структури СВКС отримати числові значення відповідних характеристик технічних засобів базової мережі СВКС з метою забезпечення середнього мінімального часу доставки повідомлень і ймовірності відмови в обслуговуванні пакетів в допустимих межах.

**Ключові слова:** самовідновлювальна комп'ютерна система, самовідновлення, обчислювальні ресурси.

### Вступ

Самовідновлювальні комп'ютерні системи (СВКС) дозволяють автоматично виявляти збої у процесі функціонування системи та швидко відновитися після них.

Самовідновлення засноване на таких етапах: програмне забезпечення, що автоматично відстежує функціонування системи; діагностування проблеми; автоматичне знаходження відповідного рішення; тестування і впровадження рішення з метою відновлення системи до нормальної функціонування. Після усунення проблеми знову запускається цикл самовідновлення, що має такі функції (рис. 1): *моніторинг*, процес збору важливої інформації, необхідної для аналізу; *аналізування*, допомагає визначити дію, яку потрібно здійснити шляхом порівняння інформації про стан із вимогами системи; *діагностування*, процес виявлення всіх життєво важливих несправностей, помилок або змін у системі; *відновлення*, складається з планування та виконання; плануються дії, які безумовно необхідні, план виконується досконало для досягнення бажаного результату для програмного забезпечення чи системи [1, 2]; *накопичення знань*, ця функція є важливою, оскільки містить усі відповідні знання, спожиті та отримані попередніми чотирма функціями [3].

Але забезпечуючи раннє виявлення і відновлення комп'ютерної системи, СВКС можуть значно знизити показники QoS [4-7]. Тому виникає необхідність підвищення ефективності обчислювальних ресурсів системи, враховуючи на особливості функціонування СВКС. При цьому необхідно мати відповідний апарат оцінки ефективності.

**Аналіз літературних джерел і постановка завдання.** Підходи до оцінки ефективності використання обчислювальних ресурсів системи розглянуті у [8-11], але вони не орієнтовані на самовідновлювальні системи. Тому метою статті є розроблення

підходу до розрахунку ефективності використання обчислювальних ресурсів комп'ютерної системи, орієнтованого на особливості самовідновлювальних структур.



Рис. 1. Цикл самовідновлення

### Результати досліджень

**1. Формалізація завдання розрахунку ефективності використання обчислювальних ресурсів.** Процес функціонування кожного  $i$ -го компонента СВКС ( $i \in \overline{1, I}$ ) моделюється у вигляді системи масового обслуговування (СМО) з обмеженою чергою, до якої надходить потік заявок з інтенсивністю  $\lambda_i$  та інтенсивністю обслуговування  $\mu_i$ . Кількість місць в черзі для  $i$ -го компонента дорівнює  $m_i$ . У загальному випадку черги пов'язані з обмеженістю входу до кожного модуля. Вхід утворюється пучком із  $n$  каналів і загальним буфером, що містить  $t$  елементів пам'яті. У випадку пуассонівського потоку вхідних заявок завдання мінімізації середнього часу затримки пакета запиту вирішується шляхом оптимізації середнього часу затримки  $\bar{T}_{spec}$  за комплексним показником для кожного  $i$ -го компонента:

$$\chi_i = f(n_i, m_i), \quad (1)$$

де  $\chi_i$  – ступінь завантаження кожного із  $n_i$  каналів компонента СВКС.

Докладно розглянемо завдання визначення мінімальної ймовірності відмови в обслуговуванні для загального випадку характеру інтенсивності вхідних заявок. Розрахунок величини середнього значення максимальної ймовірності відмови  $\bar{P}_{fail}^{\max}$  визначається такими кількісними характеристиками параметрів інтегрованої програмної платформи:  $F_i$  – обсяг інформаційного обміну;  $V_i$  – середня пропускна спроможність каналів;  $m_i$  – ємність буферної пам'яті. Середня кількість зайнятих каналів для  $i$ -го модуля базової мережі визначається як

$$\bar{z}_i = \rho_i \left( 1 - \frac{\rho_i^{n_i+m_i}}{n_i^{m_i} \cdot n_i!} \cdot P_0 \right), \quad (2)$$

де  $\rho_i = \lambda_i / \mu_i$  – приведена інтенсивність потоку заявок, при цьому ймовірність відмови в обслуговуванні чергового пакету, що надійшов до  $i$ -го компонента СВКС через відсутність місць в черзі є такою:

$$P_{i, fail} = \frac{\rho_i^{n_i+m_i}}{n_i^{m_i} \cdot n_i!}, \quad (3)$$

а  $P_0$  – імовірність того, що канали вільні, немає черги і заявок на обслуговування, розраховується як

$$P_0 = \left( \sum_{\alpha=0}^{n_i-1} \frac{(n_i \cdot \chi_i)^\alpha}{\alpha!} + \frac{(n_i \cdot \chi_i)^{n_i}}{n_i!} \cdot \frac{1 - \chi_i^{m_i+1}}{1 - \chi_i} \right)^{-1}, \quad (4)$$

де  $\chi_i = \rho_i / n_i$  – ступінь завантаження каналів  $i$ -го компонента СВКС.

Середня кількість заявок, що знаходяться в черзі, може бути знайдена як

$$\bar{r}_i = P_{i, fail} \sum_{\alpha=1}^{m_i} \alpha \chi_i^{-(m_i-\alpha)}, \quad (5)$$

Середня кількість заявок до  $i$ -го компонента визначиться з виразу:

$$\bar{W}_i = \bar{z}_i + \bar{r}_i. \quad (6)$$

З урахуванням виразів (2-5) вираз (6) буде таким:

$$\bar{W}_i = n_i \chi_i (1 - P_{i, fail}) + P_{i, fail} \sum_{\alpha=1}^{m_i} \alpha \chi_i^{-(m_i-\alpha)}. \quad (7)$$

Це співвідношення є вірним для будь-якого компонента СВКС в якому значення  $\rho$  не залежить від напрямку передачі, тобто

$$\chi_i = \rho / n_i \approx \chi. \quad (8)$$

Ймовірності втрат в кожному  $i$ -му компоненті можна приблизно порівняти одне до одного, тобто

$$P_{i, fail} \approx \bar{P}_{fail}. \quad (9)$$

Використовуючи формулу Літтла для окремих модулів [12] маємо

$$\gamma \bar{T}_{spec} = k \bar{W}_i. \quad (10)$$

З урахуванням (7) визначається середній час затримки заявки є таким:

$$\bar{T}_{spec} = \frac{1}{\gamma} \cdot k \left( \frac{\bar{P}_{fail} \sum_{\alpha=1}^{m_i} \alpha \chi^{-(m_i-\alpha)} + n \chi (1 - \bar{P}_{fail})}{\gamma} \right). \quad (11)$$

Нехай допустимий час затримки пакету в СВКС не перевищує фіксованого значення, тобто

$$\bar{T}_{spec} \leq T_{spec}^{accept}. \quad (12)$$

З (11) визначимо середню максимальну ймовірність втрати заявок в СВКС в межах допустимого часу їх затримки:

$$\bar{P}_{fail}^{\max} = (\gamma \bar{T}_{spec} - k n_i \chi) / \left( k \sum_{\alpha=1}^{m_i} \alpha \chi^{-(m_i-\alpha)} - k n_i \chi \right). \quad (13)$$

Отримана формула (13) має екстремум (максимум), алгоритм пошуку якого розглянемо нижче.

**2. Алгоритм пошуку прийнятних значень ступеню завантаженості пучка каналів.** Обчисливши часткову похідну:

$$\partial \bar{P}_{fail} / \partial \chi = 0, \quad (14)$$

отримуємо локальний екстремум, котрий, виходячи із унімодальності  $\bar{P}_{fail}^{\max}$  є глобальним. Адитивність функції (10) і умови (6) визначають сепарабельність  $\bar{P}_{fail}$ , тому

$$\frac{\partial \bar{P}_{fail}}{\partial \chi} = \frac{d \bar{P}_{fail}}{d \chi} = 0. \quad (15)$$

Позначимо  $A = \frac{\gamma}{k} \cdot T_{spec}^{accept}$ . Тоді із (11) маємо:

$$\bar{P}_{fail} = (A - n_i \chi) / \left( \sum_{\alpha=1}^{m_i} \alpha \chi^{-(m_i-\alpha)} - n_i \chi \right). \quad (16)$$

З іншого боку

$$A - n_i \chi = \frac{\sum_{\alpha=1}^{m_i} \alpha \chi^{-(m_i-\alpha)} - n_i \chi}{\left( 1 + \frac{1}{n_i} \sum_{\alpha=1}^{m_i} \alpha (m_i - \alpha) \chi^{-[m_i-(\alpha-1)]} \right)}. \quad (17)$$

Підставивши (17) в (16) отримаємо вираз для визначення середньої максимальної ймовірності відмови за час не більше допустимого  $T_{spec}^{accept}$ :

$$\bar{P}_{fail}^{\max} = 1 / \left( 1 + \frac{1}{n_i} \sum_{\alpha=1}^{m_i} \alpha (m_i - \alpha) \chi^{-[m_i-(\alpha-1)]} \right). \quad (18)$$

Але мають місце вирази (1), (2), які в сукупності, з урахуванням (6), можна уявити як

$$\bar{P}_{fail}^{\max} = \frac{(n_i \chi)^{n_i+m_i}}{n_i! n_i^{m_i}} \cdot \frac{1}{\sum_{\alpha=0}^{n_i} \frac{(n_i \chi)^\alpha}{\alpha!} + \frac{(n_i \chi)^{n_i}}{n_i!} \sum_{\alpha=1}^{m_i} \chi^\alpha}. \quad (19)$$

Після перетворення (16) отримаємо:

$$\overline{P}_{fail}^{max} = \frac{1}{\frac{n_i!}{\chi^{m_i}} \sum_{\alpha=0}^{n_i} \frac{(n_i \chi)^{-(n_i-\alpha)}}{\alpha!} + \sum_{\alpha=1}^{m_i} \chi^{-(m_i-\alpha)}}. \quad (20)$$

Ліві частини виразів (20) і (15) є рівними. Отже, можна стверджувати:

$$\frac{n_i!}{\chi^{m_i}} \sum_{\alpha=0}^{n_i} \frac{(n_i \chi)^{-(n_i-\alpha)}}{\alpha!} + \sum_{\alpha=1}^{m_i} \chi^{-(m_i-\alpha)} = 1 + \frac{1}{n_i} \sum_{\alpha=1}^{m_i} \alpha(m_i - \alpha) \chi^{-[m_i-(\alpha-1)]}. \quad (21)$$

Після низки перетворень (21) отримуємо:

$$\sum_{\alpha=0}^{n_i} \frac{n_i!}{\alpha!} (n_i \chi)^{-(n_i-\alpha)} = \sum_{\alpha=1}^{m_i-1} \left( \frac{\alpha(m_i - \alpha)}{n_i \chi} - 1 \right) \chi^\alpha, \quad i \in \overline{1, I}. \quad (22)$$

Визначимо корені рівняння (22). Вони змінюються в межах  $0 \leq \chi < 1$ . При  $\chi \geq 1$  середній час затримки пакетів в СВКС і ймовірність їх втрат значно зростають. Тому рішення рівняння (22) є прийнятними значеннями ступеня завантаження каналів

$\chi_{accept}$ .

**3. Знаходження оптимального інформаційного навантаження компонентів СВКС за комплексним показником.** Отриманий результат у вигляді рівняння (22) дозволяє стверджувати про однозначне дотримання прийнятних оптимальних значень ступеня завантаження каналів компонентів СВКС  $\chi_{accept}^{opt}$ , як мінімального середнього часу затримки пакетів при заданій допустимій ймовірності їх втрат, так і середньої максимальної ймовірності втрат пакетів  $P_{fail}^{accept}$ . При заданому допустимому часі затримки пакетів залежать, як від необхідного значення ймовірності втрат пакетів  $P_{fail}^{accept}$ , так і від допустимого часу їх затримки  $T_{spec}^{accept}$ . Можна сказати, що затримки пакетів є функціями дискретних значень кількості каналів  $n$  і числа місць у черзі  $m$ .

Рівняння (22) є функцією однієї змінної  $\chi$ . Це надає можливість незалежно визначити прийнятне значення ступеня завантаження каналу для кожного модуля мережі  $\chi_{i reason}$ . Але дані рівняння є трансцендентними. Тому отримати точний аналітичний розв'язок (22) не представляється можливим. Але ці рівняння можуть бути вирішені або чисельним, або графічним методом. Визначимо значення  $\chi_{i reason}^{opt}$  і величину сумарного потоку на вході  $i$ -го компонента СВКС, заданого матрицею тяжіння  $\|F_{ij}\|$ . Необхідна кількість каналів передачі  $i$ -го компонента СВКС і їх пропускну здатність визначимо, виходячи зі співвідношення:

$$\chi_{i reason}^{opt} = \frac{\lambda_i}{n_i \cdot \mu_i} = \frac{L \cdot \lambda_i}{n_i \cdot L \cdot \mu_i} = \frac{F_i}{V_i \cdot n_i}; \quad (23)$$

$$\chi_{i reason}^{opt} = f(m_i, n_i),$$

де  $F_i = L \cdot \lambda_i$  – сумарний потік на вході  $i$ -го компонента СВКС, а  $V_i = L \cdot \mu_i$  – пропускну здатність кожного із  $n_i$  каналів.

Оптимізація за комплексним показником  $\chi_{i reason}^{opt}$ , визначеним у (23), дозволяє варіювати величинами  $V_i$ . Залежно від класу трафіка  $F$  можна надати будь-яку сукупність каналів для компонентів СВКС. При цьому формується віртуальний канал зі змінною пропускну здатністю. Такий канал не залежить від необхідного значення  $T_{spec}^{accept}$ . При цьому ймовірність відмови в обслуговуванні пакета буде залишатися в межах допустимого значення  $P_{отк}^{accept}$ . Це дозволяє надати сукупність каналів із заданою шириною смуги пропускання. При цьому залишається прийнятне значення  $\chi_{i reason}^{opt}$ . Середній час затримки пакета в мережі також залишається в межах допустимого значення  $T_{spec}^{accept}$ .

Чисельний метод рішення реалізований за допомогою програми Mathcad. На рис. 2 наведений варіант розрахунку залежностей пропускну здатності каналу та обсягу буферної пам'яті від завантаження каналів.

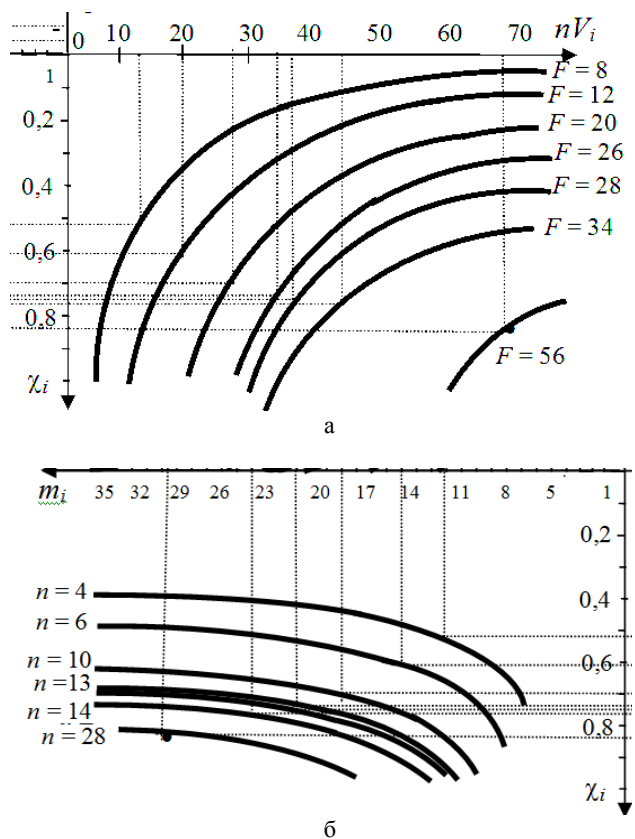


Рис. 2. Залежність пропускну здатності каналу (а) та обсягу (б) буферної пам'яті від завантаження каналів

Проведений аналіз результатів показав, що в межах встановлених значень параметрів можна здійснити обмін пропускну здатності каналу на обсяг буферної пам'яті на вході в даний канал. При цьому необхідно підтримувати сталість якісних показників СВКС (час затримки, ймовірність втрати пакетів) в допустимих межах.

Отже, запропонований підхід до отримання оптимальних значень ступеня завантаження каналів СВКС, тобто для кожного самовідновлювального компонента розраховується кількість каналів передачі даних і необхідна пропускну здатність. Це дає можливість при синтезі інформаційної структури СВКС отримати числові значення відповідних характеристик технічних засобів базової мережі з метою забезпечення середнього мінімального часу доставки повідомлень і ймовірності відмови в обслуговуванні пакетів в допустимих межах.

## Висновки

В результаті проведених досліджень отримані такі результати: формалізовано завдання розрахунку ефективності використання обчислювальних ресурсів; розроблено алгоритм пошуку прийнятних значень ступеню завантаженості пучка каналів компонент; запропоновано спосіб знаходження оптимального інформаційного навантаження компонентів СВКС за комплексним показником.

Отже, розроблено метод розрахунку ефективності використання обчислювальних ресурсів комп'ютерної системи, орієнтованого на особливості самовідновлювальних структур.

Метод дозволяє при синтезі інформаційної структури СВКС отримати числові значення відповідних характеристик технічних засобів базової мережі СВКС.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Shefer O.V., Alnaeri Frhat Ali. Optimum flow distribution in the network with adaptive data transfer. *Electronics and Control Systems*. 2020. No. 4(66). P.45-50. DOI: <https://doi.org/10.18372/1990-5548.66.15254>
2. Рубан І.В., Волк М.О., Рісучін М.В. Метод самовідновлення розподіленого програмного забезпечення в гетерогенних комп'ютерних системах. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2019. № 3 (64), с. 17-23/
3. Коломійцев О. В. Метод розрахунку розміру буферної пам'яті самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі / Oleksii Kolomiitsev, Alnaeri Frhat Ali, Inna Petrovska // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2021. – Т. 2 (64). – С. 144-147. – doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.2.144>.
4. Кучук, Н., Шефер, О., Чернева, Г., & Алнаері, Ф. А. (2021). Визначення пропускну здатностей самовідновлювального сегмента мережі. *Сучасні інформаційні системи*, 5(2), 114–119. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.16>
5. Срібна І. М., Кучук Г. А., Лебедев О. Г., Алнаері Фрхат Алі. Синтез топологічної структури самовідновлюваного та масштабованого сегмента мережі передачі даних. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2020. № 4 (69). С. 95-106. DOI: [10.31673/2412-4338.2020.049516](https://doi.org/10.31673/2412-4338.2020.049516)
6. Волк М. А., Клєнов А. Е. Исследование методов обеспечения живучести системного программного обеспечения. *Сучасні напрями розвитку ІКТ та засобів управління*. Полтава – Баку – Харків – Жиліна. 2018. С. 40.
7. Ткачов, В., Коваленко, А., Кучук, Г., & Ні, Я. (2021). Метод забезпечення живучості високомобільної комп'ютерної мережі. *Сучасні інформаційні системи*, 5(2), 159–165. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.24>
8. Sobieraj M., Stasiak M., Weissenberg J. Analytical model of the single threshold mechanism with hysteresis for multi-service networks. *IEICE Transactions on Communications*. 2012. Vol. E95.B, No. 1. P. 120–132.
9. Kurose J., Ross, K. *Computer networking: a top-down approach*, 7th ed. Harlow: Pearson, 2017. 864 p.
10. Kuchuk N., Mozhaiev O., Mozhaiev M., Kuchuk H. Method for calculation of R-learning traffic peakedness. *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2017 – Proceedings*. 2017. P. 359-362. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246416>
11. Vapnik V. *Estimation of Dependences based on Empirical Data*, N.-Y., Berlin : Springer-Verlag, 1987. 326 p.
12. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V. Improving Big Data Centers Energy Efficiency: Traffic Based Model and Method / Kharchenko V., Kondratenko Y., Kacprzyk J. (eds) *Green IT Engineering: Social, Business and Industrial Applications. Studies in Systems, Decision and Control*. Vol 171. Cham: Springer, 2019. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)

Received (Надійшла) 15.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.08.2021

## Calculation of computer resources use efficiency of self-healing computer system

Nina Kuchuk, Anna Shiman, Alevtina Filonenko, Serhii Bulba

**Abstract.** The article considers self-healing computer systems (ShCS). **The subject of research** is methods for calculating the efficiency of the use of computing resources in computer systems. **The purpose of the article** is to develop an approach to calculating the efficiency of computing resources of a computer system, focused on the features of self-healing structures. The methods used are methods of research of queuing systems. **The following results** were obtained: the task of calculating the efficiency of the use of computing resources was formalized; the algorithm of search of acceptable values of degree of loading of a bunch of channels of components is developed; the method of finding the optimal information load of ShCS components according to the complex indicator is offered. **Conclusions.** A method for calculating the efficiency of using computing resources of a computer system focused on the features of self-healing structures has been developed. The method allows the synthesis of the information structure of ShCS to obtain numerical values of the corresponding characteristics of the technical means of the basic network of ShCS in order to ensure the average minimum time of message delivery and the probability of failure to service packets within acceptable limits.

**Keywords:** self-healing computer system, self-healing, computing resources.

A. Maslov, O. Dzuban, T. M. Derkach, T. A. Dmytrenko

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

## OPERATIONAL ASPECTS OF WEB-APPLICATIONS DEVELOPMENT BASED ON JAVASCRIPT FRAMEWORK

**Abstract.** The problem of using hypertext markup language HTML5 and cascade style sheets CSS3 while developing the visual interface of applications in development framework based on programming language JavaScript was studied. The performance features of main components of application infrastructure were analyzed. JSON format usage and influence on application operation of such elements as repository data base, WEB-services, server and client side portion of application and content delivery network were investigated. The main criteria of development socially minded applications with attractive visual interface on JavaScript and HTML5 were defined. The analysis of operational aspects of JavaScript programming language and its usage while developing visual interface of applications and its further promotion in the world of hardware and software was carried out. The research result is the information system development for courier delivery.

**Keywords:** JavaScript, HTML, JSON, REST, Ajax, browser, application, repository data base.

### Introduction

After release version of HTML5 [1] appeared in the beginning of current decade, this markup language began to be used not only as language for determining the web pages content, but also as markup language for visual interfaces of applications in development framework based on the programming language JavaScript [2]. JavaScript is a programming language that allows you to make a Web-page interactive, which responds to user actions. It helps to make website pages more interactive, processes actions of website users. JavaScript widely uses the capabilities of the environment, where it is run. JavaScript became even more popular among developers, when AJAX-technology appeared, which led to a new stage in websites development. This programming language is usually used as a built-in language for programmatic access to application objects. It is most widely used in browsers as a scripting language to make web-pages interactive. Along with HTML and CSS, JavaScript is the third most important block, on which most standard web interfaces are based. To understand how the language works, the user needs the basic knowledge of HTML and CSS [3].

**The aim of the article** is to analyze the operational aspects of the JavaScript programming language and its usage while developing visual interfaces of applications and its further promotion in the world of hardware and software.

### The main material

For a long time there were no means of external data storage using JavaScript. If it was necessary to save the data, then you had to send the form to a webserver and wait until the page reloaded. This interrupted the process of developing fast and dynamic web applications. With appearance of Ajax technology (Asynchronous Javascript and XML) [3] in Internet Explorer, which was established by Microsoft the situation has changed [3]. Shortly afterwards, software support for all the features of XMLHttpRequest object that underlies this technology was added to other browsers.

In the beginning of 2004, Google launched the Gmail email application. The appearance of this service

became an innovative step for Google, as the application provided its users with almost unlimited storage for their e-mails. Gmail also marked an important innovation in the functional structure of web applications: web-page reloading was in the past[4]. In general, Gmail due to using new Ajax technology is single-page, fast and sensitive web-application, which has forever changed the way of developing applications of this type. Since that time, web-developers created applications of almost all types including large-scale, cloud based productivity suites, social API, like Facebook's JavaScript SDK, and even graphically intense video games.

JavaScript has very rich object-oriented (OO) capabilities. JSON standard (JavaScript Object Notation), which is used in almost all modern web applications for both communication and data storage is a subset of an excellent notation of JavaScript object literals. JavaScript uses prototypal inheritance pattern. Prototypes of objects are used instead of classes. New objects automatically inherit the methods and attributes of their parent object through a chain of prototypes [1].

While each application written in JavaScript is unique, most of them have some common elements, such as hosting infrastructure, resource management, presentation, and behaviour of interface user.

The object notation JavaScript (JSON) is an open standard, developed by Douglas Crockford. JSON is a subset of JavaScript object literals syntax for using in data presentation, transmission, and storage. Before the JSON specification appeared, most client-server communications were performed using much more verbose snippets in the XML markup language. JavaScript developers use many web services that use JSON notation and often define internal data using JSON syntax.

The JSON format is almost identical to the syntax of JavaScript object literals with a few important differences: all attribute names and string values must be in double quotes. Other values may appear in their literal form; JSON records cannot contain cyclic links; JSON cannot contain functions.

Before extended markup language XML (Extensible Markup Language) and data repositories JSON appeared almost all services maintained relational database management system (RDBMS). RDBMS contain



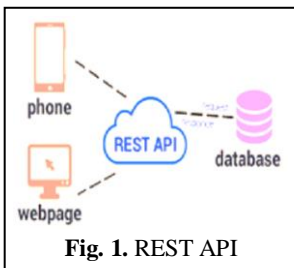
discrete data points in tables and group the data that is displayed by viewing the tables in response to requests written in the language of structured SQL requests [2].

NoSQL data repositories store all records as documents or document fragments, without using table-based structured memory. Document-oriented data repositories typically store data in XML format, while object-oriented data repositories typically use JSON format. The latter is particularly well suited for web application development, as the JSON format is used internally for data exchange in JavaScript language.

Examples of popular JSON-based NoSQL data repositories include MongoDB and CouchDB. Despite the current popularity of NoSQL, it is still possible to find modern JavaScript programs based on MySQL databases and similar RDBMS.

State transmission architecture REST (Representational State Transfer) is client-server communication architecture, which provides division of entities between data resources and user interfaces (or other consumers of information resources, such as data analysis tools and aggregators). Web services that fully follow REST architecture are called RESTful. The server manages data resources (such as user records), but does not implement or include user interface. Clients are free to implement the user interface (or not implement it) in any form and in any language [4]. REST architecture does not deal with how user interfaces are implemented. It only deals with maintaining the state of the application between the client and the server.

RESTful web services use HTTP method verbs to



report the server what actions the client means. The following actions are provided (Fig. 1): create a new item in a resource collection: HTTP POST; get a resource view: HTTP GET; update (replace) resource: HTTP PUT; delete a resource: HTTP DELETE.

This corresponds to the four basic functions of the CRUD interface (create, retrieve, update, delete), designed to work with persistent data repositories. It is just necessary to remember that in the REST view, the "update" action actually means the "replace" action. Beginners spend more than one day to create such crud. An experienced developer, in well-developed framework, this process takes several hours at the most. Slim, like other micro-frameworks, does not provide any means of automation, so you have to do a lot by yourself. For training purposes, this is justified, but in industrial development, what can be automated must be automated.

PUT or POST are usually confused to change a resource. REST makes it easier to resolve this collision PUT is used if the client is able to generate its own secure identifiers (IDs). In all other cases, POST is carried out to create a new resource. In such cases, the server generates a resource identifier (ID) and returns it to the client.

For example, you can create a new user including / users / in the POST request, in the result the server will generate a unique ID that can then be used to access the

new resource in / users / userid. The server will return a new user view with its own unique URI. An existing resource cannot be modified with a POST request; a descendant can only be added to it [1].

Official HTTP RFC defines POST:

- Annotation of existing resources;
- Posting a message on a blackboard, in a news-group, mailing list or similar group of articles;
- Providing a block of data, such as the result of sending the form, the data processing;
- Extension of the database with an additive operation. [9]

PUT request must be used if you want to change the displayed user name by specifying / users / userid to record the user being updated. It should be noted that this request completely replaces the user record, so you need to make sure that PUT view contains everything that is needed. The difference between PUT and POST is that PUT is idempotent, it means that single and multiple calls of this method, with an identical data set, will have the same result (without irrelevant effects), in the case of POST, a multiple call with an identical data set can cause irrelevant effects.

Based on the analysis, an information system for courier delivery was developed.

The use case diagram was built, which reflected the relationship between actors and use cases in the system design (Fig. 2). For the system functioning, the base has been designed and developed, in which connections between objects are built (Fig. 3). The emphasis was on creating an easy-to-understand and use a web resource in the architecture design. All fields and necessary functionality are easily accessible (Fig. 4, 5)

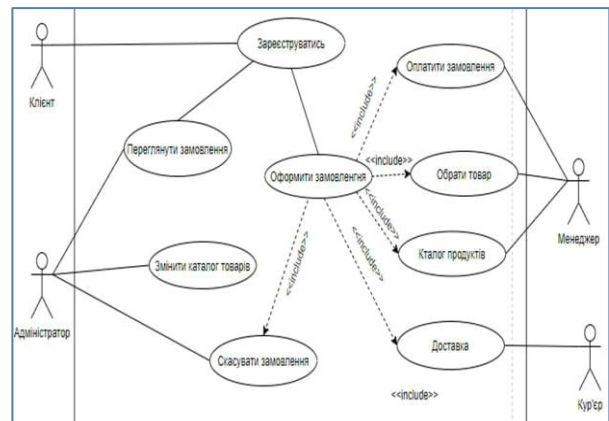


Fig. 2. The usage options diagram

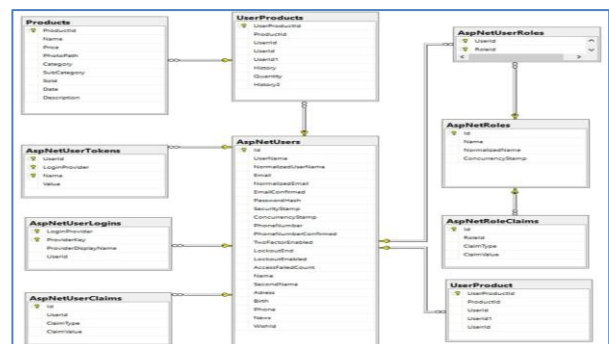


Fig. 3. The information system database scheme

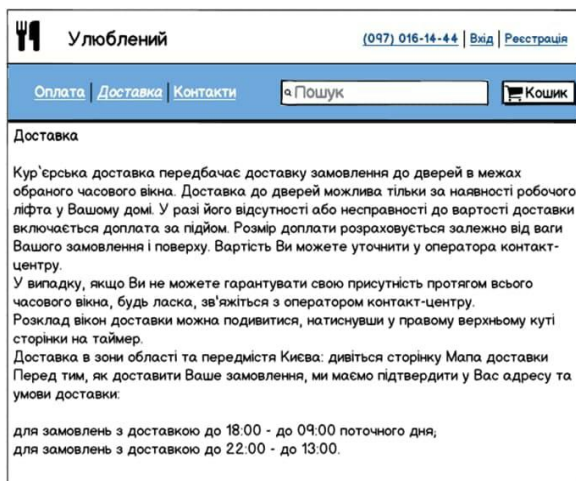


Fig. 4. The information system homepage

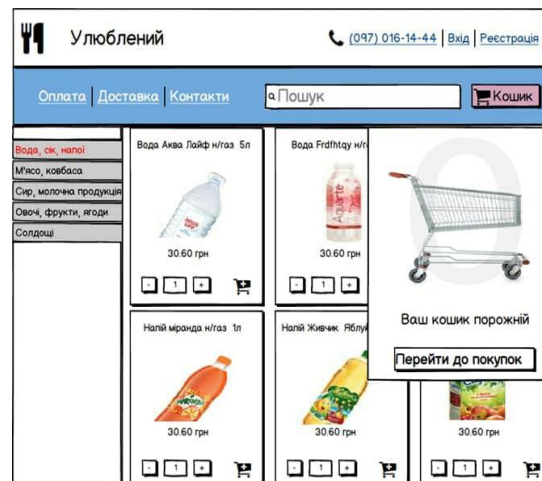


Fig. 5. Order selection page

## Conclusions

The JavaScript programming language has a lot in common with languages such as C #, C ++, Java, or PHP.

The syntax of JavaScript is clear to anyone who has experience with these languages, and this explains the popularity of JavaScript, although it is important to understand that internally JavaScript is implemented quite differently from the compilers of these languages.

JavaScript has very rich object-oriented (OO) capabilities. JSON standard (JavaScript Object Notation), which is used in almost all modern web applications for both communication and data storage is a subset of an excellent notation of JavaScript object literals [4].

Currently, modern applications are developed on JavaScript, the visual interfaces of which are better than the visual interfaces of desktop applications. Recently, JavaScript is actively promoted in the world of hardware and software. Such projects as Arduino, Tessel, Espruino and NodeBots are approaching the time when JavaScript can be a common language for embedded systems and robotics. Modern JavaScript programs are the most sensitive and socially attractive among programs which were ever written. We can say that JavaScript developers are in the centre of "revolutionary" events in the history of computer engineering and the Internet in real time.

On the basis of the analysis carried out, an information system was designed and developed for creating a courier delivery order in the work.

## REFERENCES

1. Brown T. Jump Start HTML5 / Tiffany B. Brown, Kerry Butters, Sandeep Panda. - Collingwood : SitePoint Pty Ltd, 2014. - 313 p.
2. Flanagan D. JavaScript: The Definitive Guide, Sixth Edition / David Flanagan. - Sebastopol : O'Reilly Media, Inc., 2011. - 1098 p.
3. Revill L. jQuery 2.0 Development Cookbook / Leon Revill. - Birmingham : Packt Publishing Ltd, 2014. - 410 p.
4. Elliott E. Programming JavaScript Applications / Eric Elliott. - Sebastopol : O'Reilly Media, Inc., 2014. - 253 p.
5. Herbert Shieldt Java 8. Complete Guide: Williams. - 2016. - 1376 p.
6. Herman David The Power of JavaScript. 68 ways to use JS efficiently; Peter - M., 2015. - 952 p.
7. Oleg Herman, Julia German Programming in Java and C # for a student: Peter. - 2015 - 512 p.
8. Chaffer D. Learning jQuery 1.3. Effective JavaScript web development; Plus symbol - M., 2015. - 391 p.
9. Spielman Sue JSTL. A practical guide for JSP programmers; KUDITS-Image - M., 2016. - 272 p.
10. Stanislav Davydov IntelliJ IDEA. Professional Java programming: Peter. - 2015. - 800 p.

Received (Надійшла) 23.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.08.2021

## Функціональні аспекти створення web-додатків на основі технологій JavaScript

А. В. Маслов, О. С. Дзюбан, Т. М. Деркач, Т. А. Дмитренко

**Анотація.** Розглянуто питання використання мови гіпертекстової розмітки HTML5 та каскадних таблиць стилів CSS3 при розробці візуальних інтерфейсів додатків в платформах розробки на базі мови програмування JavaScript. Проаналізовані особливості функціонування основних компонентів інфраструктури додатка. Досліджено використання формату JSON та вплив на роботу додатка таких елементів, як сховище даних, веб-сервіси, серверна та клієнтська частини додатка та мережа доставки контенту. Сформульовані основні критерії розробки на JavaScript і HTML5, соціально значущих додатків з привабливими візуальними інтерфейсами. Проведено аналіз функціональних особливостей мови програмування JavaScript та використання її під час розробки візуальних інтерфейсів додатків й подальшого просування її у світ технічних засобів.

**Ключові слова:** JavaScript, HTML, JSON, REST, Ajax, браузер, додаток, сховище даних.

О. І. Піскачов<sup>1</sup>, І. В. Піскачова<sup>2</sup>, В. П. Ткаченко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний технічний університет сільського господарства, Харків, Україна

<sup>3</sup> НДПКТИ мікрографії, Харків, Україна

## ВИБІР МАТЕРІАЛУ ТАРИ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ МІКРОФІЛЬМІВ МЕТОДОМ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ

**Анотація.** Зберігання мікрофільмів та їх використання мають важливе значення для заощадження інформації: найважливіших технічних, будівельних, історичних, культурних та інших даних. На стан документів негативно впливають режими зберігання, фактори, які діють за межами допустимих умов («оцтовий синдром», біологічна вразливість, «нітратний синдром» та інші), які можуть викликати прискорення їх старіння і передчасне руйнування та загрожують істотним скороченням термінів зберігання архівних документів. У статті використані результати аналізу особливостей, порядку організації заощадження мікрофільмів як архівних документів і причин повної і часткової втрати інформації на них. Результати довгострокового заощадження архівних документів залежать не тільки від режиму зберігання, а й матеріалів з яких зроблена тара. Як матеріали для тари розглядаються пластмаси, метали, картон. Для вирішення актуальної задачі визначення пріоритетності використання різних матеріалів для виготовлення тари для зберігання мікрофільмів показана можливість використання методу аналізу ієрархій. Цей метод відноситься до класу критеріальних і дозволяє більш об'єктивно проводити експертну оцінку. Для оцінки обрані такі критерії: антигрибкові властивості, механічні характеристики і пожегобезпечність, захист від оцтового синдрому, вага, вартість коробок.

**Ключові слова:** тара, матеріал, мікрофільм, метал, картон, пластмаса, зберігання, ієрархія, метод, критерій.

### Вступ

Необхідності збереження мікрофільмів як архівних документів завжди приділялася особлива увага. З моменту їх появи вживалися заходи щодо збереження їх властивостей. Неправильне їх зберігання або використання можуть призвести до повної і часткової втрати інформації на мікрофільмах, які зберігають в собі найважливіші технічні, будівельні, історичні, культурні та інші дані. При цьому слід ураховувати, що вартість повторної розробки документації, наприклад, на промислову продукцію приблизно у 50 разів більша вартості створення страхового фонду документації, яка складає менше 2-х відсотків від первинної вартості розробки документації [1]. Тому необхідно вирішити актуальну задачу забезпечення якісного зберігання мікрофільмів як архівних документів.

**Аналіз публікацій.** В статті [2] проведено аналіз заощадження архівних документів, який зазначив, що матеріали і технології виготовлення більшості кіно- і фотодокументів розроблялися без урахування необхідності їх довготривалого архівного зберігання, тому їх життєвий цикл, як правило, істотно коротше, ніж у традиційних документів на паперовій основі. За довготривалого зберігання кіно- і фотодокументів часом виявляються (або посилюються) деякі особливості старіння окремих видів документів («нітратний синдром», «оцтовий синдром», біологічна вразливість тощо), які не враховувалися на стадіях проектування і виготовлення відповідних виробів. Ці особливості в ряді випадків загрожують істотним скороченням термінів зберігання архівних документів, які потребують спеціальних умов зберігання, періодичного контролювання їх стану, а часом і невідкладних заходів з реставрації або перекопіювання. Найбільш негативно

впливають на старіння і передчасне руйнування архівних документів світловий, температурний, вологісний та санітарно-гігієнічний режими зберігання архівних документів. Спільний вплив двох і більше факторів за межами допустимих умов зберігання різко знижує тривалість життя архівних документів, часом роблячи неможливим забезпечити їх збереження навіть протягом 10 років.

Результати довгострокового заощадження архівних документів залежать не тільки, наприклад, від температурно-вологісного режиму зберігання, а й матеріалів з яких зроблена тара.

Вибір необхідного матеріалу тари для зберігання архівних документів є актуальною проблемою і може бути віднесений до загальної задачі ранжирування [3, 4]. Методи вирішення такого типу задач ґрунтуються на математичній теорії прийняття рішень і передбачають розташування об'єктів у деякій послідовності відповідно до значень їх пріоритетності, тобто приводять до створення рангової шкали.

Одним з найбільш відомих і широко вживаних методів ранжирування об'єктів дослідження є метод обробки експертних оцінок, що ґрунтується на принципах виявлення узагальнюючої думки експертів [3-7]. Недоліком такого підходу до оцінки об'єктів є те, що ймовірність істинності колективної експертної думки в значній мірі залежить від чисельності групи експертів та рівня їх компетентності, а обробка оцінок у складних ситуаціях (особливо при роботі відносно великих за кількісним складом груп) без спеціально розроблених процедур не завжди дає достовірний результат.

### Основна частина

У даній роботі на прикладі задачі визначення пріоритетності використання різних матеріалів для виготовлення тари для зберігання мікрофільмів

показана можливість використання методу аналізу ієрархій (далі-МАІ) [4] для вирішення проблем ранжирування. Цей метод відноситься до класу критеріальних і дозволяє більш об'єктивно проводити експертну оцінку. Він отримав виключно широке поширення і активно застосовується до цього дня, особливо в США.

В основі МАІ використовується лінійна згортка, але оцінки альтернатив і ваги критеріїв знаходять особливим способом.

Перший етап МАІ зводиться до виділення в основній задачі декількох рівнів і подальшого їх структурування у вигляді деякої ієрархії. Для прикладу, що розглядається, ієрархія проблеми може бути такою, як на табл. 1. Шкала відносної важливості елементів ієрархії наведена у табл. 2, а матриця попарних порівнянь – у табл. 3.

Головна задача (мета) формулюється в рівні 1. Рівень 2 складається з елементів задачі, що визначають або уточнюють критерії її рішення (А).

Таблиця 1 – Схема ієрархії задачі

<b>Рівень 1</b>	Мета: пріоритетний вибір матеріалів для виготовлення тари для зберігання мікрофільмів				
<b>Рівень 2</b>	Елемент 1	Елемент 2	Елемент 3	Елемент 4	Елемент 5
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>
	Антигрибкові властивості	Механічні характеристики. Пожежобезпечність	Захист від оцтового синдрому	Вага	Вартість коробок
<b>Рівень 3</b>	B <sub>1</sub>		B <sub>2</sub>		B <sub>3</sub>
	Пластмаси		Метали		Картон

Таблиця 2 – Шкала відносної важливості елементів ієрархії

Інтенсивність відносної важливості ( $W_i/W_j$ )	Визначення	Пояснення
1	Рівна важливість	Рівний (однаковий) вклад двох факторів в досягненні мети
3	Помірна перевага одного над іншим	Досвід і судження дають незначну перевагу одному фактору над іншим
5	Істотна або сильна перевага	Досвід і судження дають істотну або сильну перевагу одному фактору над іншим
7	Значна перевага	Одному фактору надається настільки сильна перевага, що вона стає практично значною
9	Дуже сильна перевага	Очевидна перевага одного фактору над іншим
2,4,6,8	Проміжні рішення між сусідніми судженнями	Застосовуються в компромісних випадках
Зворотні величини приведених чисел	Якщо при порівнянні першого фактору з другим одержуємо одне із вище наведених чисел (наприклад 5), то при порівнянні другого фактору з першим одержимо зворотну величину (тобто 1/5)	

Таблиця 3 – Матриця попарних порівнянь

Елемент вищого рівня	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>j</sub>	A <sub>n</sub>
A <sub>1</sub>	W <sub>1</sub> /W <sub>1</sub>	W <sub>1</sub> /W <sub>2</sub>	W <sub>1</sub> /W <sub>j</sub>	W <sub>1</sub> /W <sub>n</sub>
A <sub>2</sub>	W <sub>2</sub> /W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub> /W <sub>2</sub>	W <sub>2</sub> /W <sub>j</sub>	W <sub>2</sub> /W <sub>n</sub>
A <sub>i</sub>	W <sub>1</sub> /W <sub>1</sub>	W <sub>1</sub> /W <sub>2</sub>	W <sub>1</sub> /W <sub>3</sub>	W <sub>1</sub> /W <sub>4</sub>
A <sub>n</sub>	W <sub>1</sub> /W <sub>1</sub>	W <sub>1</sub> /W <sub>2</sub>	W <sub>1</sub> /W <sub>3</sub>	W <sub>1</sub> /W <sub>4</sub>

Далі необхідно отримати оцінки кожної альтернативи по кожному критерію. Якщо існують оцінки, то вони просто виписуються і нормуються таким

чином, щоб їх сума дорівнювала одиниці. Якщо для критерію не існує об'єктивних оцінок, метод Саати пропонує використовувати парні порівняння.

До рівня 3 входить перелік пропозицій відносно головної задачі (В), які повинні бути оцінені з точки зору досягнення мети.

Для вирішення поставленої вище задачі потрібно скласти п'ять матриць для елементів рівня III (В-елементи,  $m = 1, 2, 3$ , табл. 4-8) і одну (матриця 6, табл. 9) – для елементів рівня II (А-елементи,  $i = 1, 2, \dots, 5$ ).

Коефіцієнти матриць парних порівнянь визначаються обчисленням вектору пріоритетів наступним чином: необхідно підсумовувати суму елементів кожного рядка і нормалізувати розподілом діленням кожної суми кожного елемента на суму всіх елементів.

Перший елемент результуючого вектору буде пріоритетом першого варіанту, другий - другого та ін. [3].

Наступним етапом МАІ є визначення локальних пріоритетів, які показують оцінку елементів нижнього рівня відповідно до задач, поставлених в елементах вищого рівня ієрархії. Одним з надійних методів визначення локальних пріоритетів є розрахунок значення власних векторів матриці ( $a_i$ )

Таблиця 4 - Матриця 1

A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	S	Y <sub>Bm</sub>
B <sub>1</sub>	1,00	3,00	0,33	4,33	0,29
B <sub>2</sub>	0,33	1,00	0,20	1,53	0,10
B <sub>3</sub>	3,00	5,00	1,00	9,00	0,61
				ΣS	14,87

Таблиця 9 - Матриця 6

Мета	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	S	Y <sub>An</sub>
A <sub>1</sub>	1,00	0,20	0,33	0,20	0,20	1,93	0,04
A <sub>2</sub>	5,00	1,00	0,33	3,00	5,00	14,33	0,28
A <sub>3</sub>	3,00	3,00	1,00	7,00	5,00	19,00	0,37
A <sub>4</sub>	5,00	0,33	0,14	1,00	3,00	9,48	0,18
A <sub>5</sub>	5,00	0,20	0,20	0,33	1,00	6,73	0,13
						ΣS	51,48

Пропонується розрахунок значення власних векторів матриці ( $a_i$ ) проводити як геометричне середнє зі значень  $W_i/W_j$  за формулами (загальний вигляд):

$$[(W_1/W_1) \cdot (W_1/W_2) \cdot \dots \cdot (W_1/W_j) \cdot \dots \cdot (W_1/W_n)]^{1/n} = a_1;$$

$$[(W_2/W_1) \cdot (W_2/W_2) \cdot \dots \cdot (W_2/W_j) \cdot \dots \cdot (W_2/W_n)]^{1/n} = a_2;$$

$$[(W_i/W_1) \cdot (W_i/W_2) \cdot \dots \cdot (W_i/W_j) \cdot \dots \cdot (W_i/W_n)]^{1/n} = a_i;$$

$$[(W_n/W_1) \cdot (W_n/W_2) \cdot \dots \cdot (W_n/W_j) \cdot \dots \cdot (W_n/W_n)]^{1/n} = a_n.$$

Оцінка або нормування векторів локальних пріоритетів ( $Y_i$ ) проводиться за формулою:

$$Y_i = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^n a_i}.$$

Таблиця 5 - Матриця 2

A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	S	Y <sub>Bm</sub>
B <sub>1</sub>	1,00	0,33	2,00	3,33	0,24
B <sub>2</sub>	3,00	1,00	5,00	9,00	0,64
B <sub>3</sub>	0,50	0,20	1,00	1,70	0,12
				ΣS	14,03

Таблиця 6 - Матриця 3

A <sub>3</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	S	Y <sub>Bm</sub>
B <sub>1</sub>	1,00	5,00	0,33	6,33	0,34
B <sub>2</sub>	0,20	1,00	0,14	1,34	0,07
B <sub>3</sub>	3,00	7,00	1,00	11,00	0,59
				ΣS	18,68

Таблиця 7 - Матриця 4

A <sub>4</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	S	Y <sub>Bm</sub>
B <sub>1</sub>	1,00	3,00	0,33	4,33	0,29
B <sub>2</sub>	0,33	1,00	0,20	1,53	0,10
B <sub>3</sub>	3,00	5,00	1,00	9,00	0,61
				ΣS	14,87

Таблиця 8 - Матриця 5

A <sub>5</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	S	Y <sub>Bm</sub>
B <sub>1</sub>	1,00	5,00	0,14	6,14	0,26
B <sub>2</sub>	5,00	1,00	0,33	6,33	0,27
B <sub>3</sub>	3,00	7,00	1,00	11,00	0,47
				ΣS	23,48

Розраховані таким методом значення  $Y_i$  наведені в таблицях матриць і зведені в таблицю 4. Значення векторів локальних пріоритетів використовують для визначення глобальних пріоритетів (P) кожного елемента рівня III, тобто відбувається ранжирування альтернатив (об'єктів). Величину P знаходять як суму попарних добутоків значень векторів локальних пріоритетів елементів нижнього рівня на відповідні значення елементів верхнього рівня:

$$P_{матер.} = Y_{A_1} \cdot Y_{B_{1m}} + Y_{A_2} \cdot Y_{B_{2m}} + \dots + Y_{A_n} \cdot Y_{B_{nm}}.$$

Отримані величини  $P_{матер.}$  для різних матеріалів наведені в табл. 10.

Отримані значення векторів глобальних пріоритетів для трьох матеріалів дозволяють розташувати їх у порядку зростання пріоритетності у такий ряд: пластмаси < метали < картон. Таким чином видно, що основні зусилля потрібно направити на підвищення споживчих характеристик картону.

Таблиця 10 - Значення векторів локальних (Y) і глобальних (P) пріоритетів елементів

$Y_{An} \backslash Y_{Bm}$	0,04	0,28	0,37	0,18	0,13	$P_{матер.}$
$Y_{B1}$	0,29	0,24	0,34	0,29	0,26	0,29
$Y_{B2}$	0,10	0,64	0,07	0,10	0,27	0,26
$Y_{B3}$	0,61	0,12	0,59	0,61	0,47	0,45

### Висновки

Використаний метод має позитивні сторони.

По-перше, ваги критеріїв і оцінки не признаються прямим рішенням дослідника, а визначаються на основі парних порівнянь, хоча і залишається невизначеним поняття щодо переваги в якусь кількість разів одного критерію над іншим.

По-друге, уявлення критеріїв у вигляді ієрархії по суті внутрішньо відповідає самому поняттю критеріїв. Коли ми використовуємо одну таблицю з критеріями для оцінки верхніх або нижніх рівнів ієрархії (дерева), то ми спрощуємо рішення задачі, що може бути неприйнятним при оцінюванні складних альтернатив.

По-третє, парні порівняння використовуються для кількісних оцінок, хоча останнім часом часто вказується, що надійніше і коректніше використовувати попарне порівняння для отримання якісних рішень.

Незважаючи на свою умовність та недостатню конкретність, наведений приклад свідчить про можливість використання МАІ для ранжирування широкого кола об'єктів при вирішенні проблеми прийняття рішення.

Слід зауважити, що при аналізі великої кількості об'єктів їх потрібно згрупувати в групи не більш ніж з 6-8 приблизно рівноважливих елементів із повторенням процедури ранжирування від групи до групи.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Створення страхового фонду документації одна із складових національної безпеки держави / М.О. Гриценко; О.І. Полонський; О.І. Піскачов // СФД (Страховий фонд документації) : наук.- вироб. журн. -2013. – №1(14), С. 40-47.
2. Проблемні питання щодо довгострокового зберігання кіно- і фотодокументів / Тімров О. О., Виноградова О. Є // СФД (Страховий фонд документації) : наук. - вироб. журн., 2020, с. 43-54.
3. Брахман, Т. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. М.: Радио и связь, 1984, 287 с.
4. Саати, Т., Кернс, К. Аналитическое планирование. Организация систем. М.: Радио и связь, 1991, 224 с.
5. Саати, Т. Л. Об измерении неосязаемого. Подход к относительным измерениям на основе главного собственного вектора матрицы парных сравнений // Журнал "Cloud Of Science". 2015. Т. 2. № 1. С. 35.
6. Саати, Т. Л. Относительное измерение и его обобщение в принятии решений. Почему парные сравнения являются ключевыми в математике для измерения неосязаемых факторов // Журнал "Cloud Of Science". 2016. Т. 3. № 2. С. 171-262.
7. Боровский, А. С., Тарасов, А. Д. Интегрированный подход к разработке общей математической модели функционирования систем физической защиты объектов // Вестник ВГУ, серия: системный анализ и информационные технологии, 2011, № 1, С. 50-59.

Received (Надійшла) 27.05.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

### Choosing material Tara for microfilms storage by the method of analysis of the hierarchy

Oleksandr Piskachov, Iryna Piskachova, Vyacheslav Tkachenko

**Abstract.** Storage of microfilms and their use are important for saving information: the most important technical, construction, historical, cultural and other data. The condition of documents is negatively affected by storage regimes, factors that operate outside the permissible conditions ("acetic syndrome", biological vulnerability, "nitrate syndrome", etc.), which can accelerate their aging and premature destruction and threaten to significantly reduce the shelf life of archival documents. This paper uses the results of the analysis of features, the order of organization of savings of microfilms as archival documents and the reasons for complete and partial loss of information on them. The results of long-term savings of archival documents depend not only on the mode of storage, but also the materials from which the packaging is made. Plastics, metals, cardboard are considered as materials for containers. To solve the urgent problem of determining the priority of using different materials for the manufacture of containers for storage of microfilms, the possibility of using the method of analysis of hierarchies is shown. This method belongs to the class of criteria and allows more objective peer review. The following criteria were selected for evaluation: antifungal properties, mechanical characteristics and fire safety, protection against acetic syndrome, weight, cost of boxes.

**Keywords:** container, material, microfilm, metal, cardboard, plastic, storage, hierarchy, method, criterion.

A. Simhayev, T. Derkach, T. Dmytrenko

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

## VIDEO AND AUDIO CONTENT ARE EFFECTIVE COMPONENTS OF SOCIAL NETWORK DEVELOPMENT

**Abstract.** The questions of the necessity to develop a social network are considered. The developed social network is offered for publishing new posts, adding and removing other members from the friends list, personal correspondence with any member. Particular attention is paid to the issues of using video content and the reasons for the popularity of video content are determined. A simple and user-friendly design is proposed to accomplish the task. The functions of the user in the developed system are considered and the use cases diagram is constructed. The social network database is described. The choice of the PHP programming language for the task implementation is analyzed and substantiated. Features of use and advantages of Open Server and Bootstrap framework are considered. The use in the development of the social network Ajax - the technology of developing web-applications has been substantiated. The work of the developed social network on the part of the user and the administrator are described. Particular attention is paid to the authorization of the user on the network, for the safety of pages. The test results are presented to check the system's correctness and the compliance of its implementation with the requirements. The project has been uploaded to shared hosting, which makes the social network ready for use on the Internet.

**Keywords:** social network, video content, framework.

### Introduction

A social network is a network where people form their social relationships. The main advantage of social media is that almost everyone feels safe and comfortable. It's much easier to make acquaintances this way. Each person feels equal in communicating with the other, it can solve the poor self-esteem problem.

Sometimes people gather around common interests and create a society. This can be a guarantee of development for certain individuals. Programmers can find people who will prompt and help if they have any problems. Artists can find inspiration for new art creations. Others use networks for learning or even work.

Accordingly, the answer to the question of why social networks are so popular in the modern world is the simple fact that they have become an integral part of modern people's lives. More than 4 billion Internet users use social networks, but every day this number is growing and does not plan to stop [1, 2].

Social media can take on different trends. For example, Facebook and similar platforms are mainly focused on exchanging photos, information, and statuses between friends. There are also social networks in the form of blogs, such as Twitter or Tumblr. Some networks have a primary goal of forcing groups or communities, and some highlight and reflect only content that is intended for a specific user. The user uses Facebook Messenger, WhatsApp, and other instant messengers if he wants to communicate. YouTube, for example, is needed when a person wants to watch a video of his favorite blogger. And this can happen any day, in any part of the world, but the information you need will always be available. There are also social networks for searching not only people who have certain interests but also the objects of these interests themselves: music, video sites, etc. [3-7].

### The main material

During creating a social network, attention was paid to the video content using. The reasons for the popularity

of video content were identified. The success of the video has been confirmed by more than one study [8]:

- 80% of users will choose a live video of a brand instead of reading a post (according to a Livestream survey);
- Video is the content with the highest ROI (according to half of the world's marketers);
- 76% of customers bought something only after watching a video with a full description of the product (data from Wyzowl).

Video catches, add color, "revives" the company, brand, product. Mostly millennials (18 to 33) view video content on social media. This is a huge pool of potential customers. Video is about high engagement, which is better than just reaching. Almost half of the users buy something by watching a video on social media networks, and social media algorithms give preference to publications with video.

In the future, the video will grow even more, especially for live broadcasts. Perhaps this will be the main way to attract an audience. Now, when even an ordinary pupil with gadgets aid and applications is able to create "authentic" photos, and live broadcasts are becoming real salvation. Technically, they are the hardest to fake, but there are many ways to prove that everything is happening "right now". And most importantly: it is inexpensive. Even ordinary people, not just entrepreneurs, can create such content without much investment of time and money.

During creating a social network for watching video content, you need to remember:

- The first 10 seconds are decisive.
- Naturalness.
- The video should make you want to share.
- The main thing is not views, but contact.
- "No" - venality, "Yes" - interesting content.
- Humor and originality
- Brevity.

The design for a social network should be simple and straightforward for the user. All pages should have a similar theme and not differ in style. Using the Figma

system, we will develop layouts of software modules and present the main ones (Fig. 2).

**Biological**

- Viewing saves time that is usually spent processing letters. The speed of image perception is 60 thousand times faster than the speed of text perception. This is how the human brain works.

**Emotional**

- With the help of a video series, you can convey much more information, impressions than a single text or just sound.

**Logical**

- Today, video is the content that is the hardest to fake. It is almost impossible for an amateur to turn this around, and the format of live broadcasts gives an additional incentive to trust the eyes.

**Social**

- The speed of life, the speed of information exchange is now very high. Instead of looking at photos, linking them to a list of features and analyzing reviews and individual blocks on the sales page, it's much easier and faster to see a comprehensive product overview.

Fig. 1. Video content popularity reasons



Fig. 2. User profile page layout

All pages of the system have a common color scheme, which allows the user to switch between pages without discomfort in the visual perception of information.

For a more specific understanding of the user's functions in the system being developed, it is necessary to build a use case diagram.

A use case diagram depicts the interaction between characters (users) and precedents (use cases) and describes the logic of the system. It allows formulating all the functions that the system supports and for which users they will be available [9].

A character (actor) is any user of the system that does not play a role in relation to it.

In this system, an actor can only be an authorized member of a social network. A person can do the

following: add and edit information about yourself; view all system users and their profiles; add and remove other members from the list of friends; add new publications where you can describe interesting information; view your friends' posts; write comments for any publications; write messages to other participants in a personal chat.

The system's use case diagram is shown in Fig. 3. The character is the user of the system.

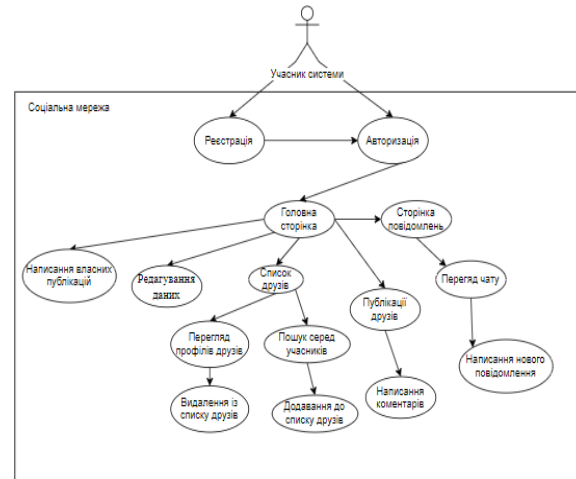


Fig. 3. The use case social network diagram

As you can see in Fig. 3, the entire range of system capabilities becomes available to the participant only after authorization.

A database is an ordered collection of data that share common properties and are designed to meet user needs. Typically, they are used for dynamic sites with a lot of data [10].

A database management system (DBMS) is a complex of software and language tools used to create and maintain the functioning of databases. They also allow you to search and modify.

The main reason for the popularity of databases is their usability. The syntax of the most popular DBMS is as clear as possible and uses the words we know, so every query can be read without any problems. It is also easy to change the data because the information in the rows can be interrelated and changing one will lead to a change in all others that use it.

A relational database is a database built based on a relational model, it stores information in spreadsheets, and data retrieval from one table is done using a relationship defined in another table.

Thus, the relational database supports what is called the entity-relationship model. The main advantage of this model is simplicity and ease of understanding for the user. And the only constituent structure of this system is the table.

It can also be noted that other data models can occur from the entity-relationship model, therefore it is the most general.

Let's describe the social network database. It consists of the following tables:

- a) user (it stores all user data):
  - id (user id);



- firstname (username);
- last name (username);
- birthday (date of birth of the user);
- phone (user's phone);
- address (user address);
- photo (personal photo of the user);
- b) authorization (table for storing authorization data):
  - id (line id);
  - email (e-mail);
  - password (user password);
  - confirm\_mail (code that is sent to the user's mail for confirmation);
  - verified (message or user confirmed mail)
- c) friends:
  - id (line id);
  - user\_id (id of the user who made the request);
  - friend\_id (id of the requested user);
  - status (status of relationships between users);
- d) messages (message table):
  - id (message id);
  - sender\_id (sender id);
  - receiver\_id (recipient id);
  - message\_text;
  - message\_time (time of sending);
- e) post (publication table):
  - id\_post (publication id);
  - author\_id (author id);
  - content (text of the publication);
  - img (photo of the publication);
  - likes (array of users who liked the post);
  - comments (array of comments for publication);
  - time (time of publication).

To implement the set task, the programming language PHP was chosen.

Reasons for choosing a programming language:

1. Simple and convenient syntax. PHP can be used even by beginners who can build small programs. And PHP code is easy to read and modify.
2. The popularity of the language. More than 75% of sites are written in PHP. In this percentage, the largest contribution was made by CMS systems, especially WordPress. Also quite popular are Joomla and Drupal which are also written in PHP [11].
3. Detailed documentation. On the official PHP site, you can find information about each component of the language, examples, and terms of use, which makes the use as convenient as possible.
4. Embedded in HTML documents. PHP code blocks can be added to any part of an HTML document, as well as to any part of a tag or its attributes. And it doesn't break the structure of the document.
5. All PHP code is executed on the server. The client can only see the result as an HTML document. And site pages are dynamically created and quickly generated.

We used Bootstrap - the most popular HTML, CSS, and JS framework that is used for project development. There are ready-made scripts and styles inside the user's Bootstrap. And to use them, you just need to add classes and HTML attributes to them [12]. The framework helps developers develop websites more

easily. If you develop a system from scratch, then all CSS styles will have to be written from scratch, and this may be more than one hundred pages of code. In addition, various errors constantly appear during development, the solution of which delays the development.

The responsive version of the site using Bootstrap is much easier to create than without it since all the elements are pre-styled.

Also, the system complex package OPEN SERVER was used as a web server. Open Server is a portable local WAMP / WNMP server that has a feature-rich manager program and a wide variety of components. The main advantage of this software package is those functions that are created specifically for users, taking into account their recommendations and wishes.

Open Server is a completely portable server that does not have any system services. You can download it to a USB flash drive and run it on any machine without fear that something will not work.

Features of Open Server:

- a) detailed viewing of the logs of all components in real-time;
- b) choice of HTTP, DBMS, and PHP modules in any combination;
- c) support for domain pointers, as well as a convenient form of their configuration;
- d) creating a local subdomain without losing the visibility of the main domain on the Internet;
- e) quick access to domains and module configuration templates;
- f) multilingual interface (Russian, Ukrainian, English).

MySQL was chosen as the database server - the most popular system was created for database management. This relational system uses all known subsystems, namely: InnoDB, MyISAM, Archive, and others. MySQL is a great solution for small applications. On Unix servers, the possibilities are maximized, because they have support for a lot of threading, which increases the performance gain.

MySQL supports the SQL query language in many extensions of the ANSI 92 standard, which various DBMS cannot offer. It is also popular for its speed and reliability. MySQL advantages:

- a) performance;
- b) ease of use;
- c) free use with no fee.

At the developing social network stage, it becomes necessary to use Ajax technology. Ajax is a web application development technology that uses code on a client machine to modify data on a web server. As a result, web pages are dynamically refreshed without reloading a full-page, interrupting data exchange. When using AJAX, there is no need to update the entire page every time, because only a specific part of it is updated, which makes using the system much more convenient [13]. The use of Ajax is done using Javascript, namely the XMLHttpRequest object. It allows the client to make HTTP requests (GET or POST) and parses the response.

Then the HTTP request goes to the address specified in the URL to the file that will carry out the calculation. Usually, this is a PHP file that interacts with the database and sends a response which is stored in XMLHttpRequest. This answer is analyzed and displayed in the appropriate block instantly.

The stylistic design of the social network is based on the interaction of white and blue colors of various shades.

As a result of the software module's development, the final product corresponds to the developed layouts (Fig. 4 - 7).

First of all, the user goes to the authorization page and is obliged to log in to use all the functions of the system. If he independently tries to go to any page, the system will automatically return him to authorization. During entering, you need to specify your mail and password.

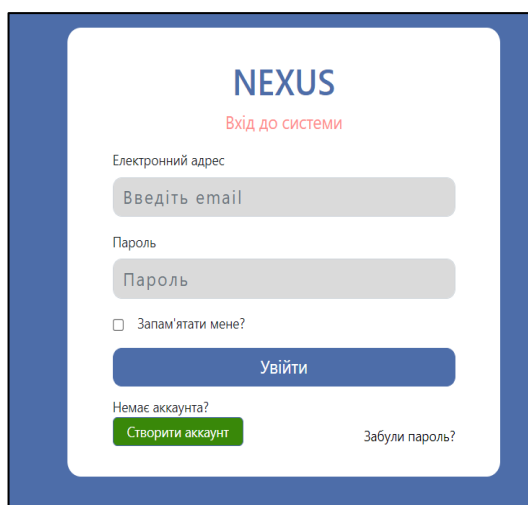


Fig. 4. Authorization window

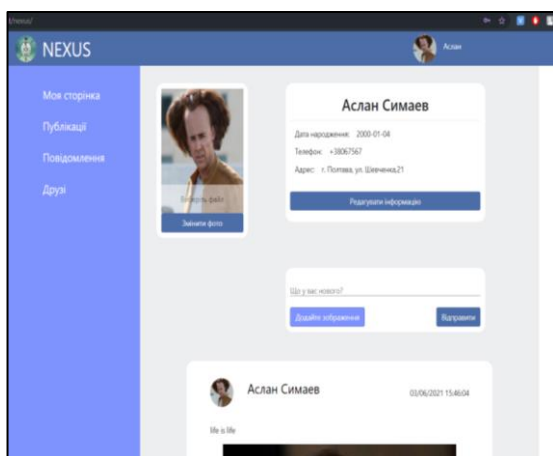


Fig. 5. User home page

If the user does not have an account, he can register. After logging in to the account, the user gets to his page.

After authorization, the user gets the opportunity to use all the features of the system. The user has the ability to edit personal information.

After selecting a chat, you can go to the personal correspondence of the participants.

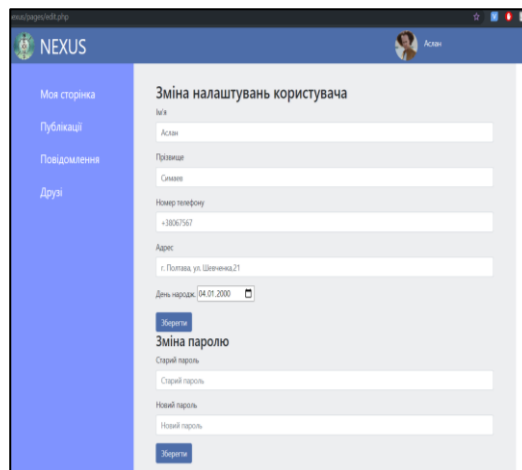


Fig. 6. Change user settings

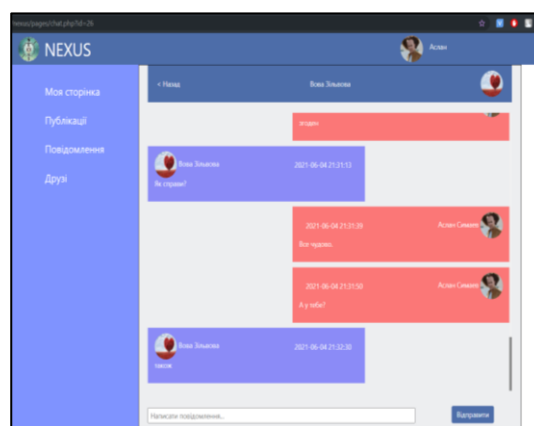


Fig. 7. Personal correspondence page

You can see a list of your friends on the friends page. Clicking the "Find Friends" button opens a modal window showing all users of the system.

You can also note that this window implements a dynamic search and by entering only one letter, you can already reduce the number of displayed users.

By selecting one of the users, you can go to the personal page, where you can view posts or change the relationship with this user.

To verify the correct operation of the system and compliance of its implementation with the requirements, testing was performed, which consisted of three parts [14]:

- a) regression testing;
- b) functional testing;
- c) user interface testing.

As a result of the previous stages of work, a serviceable system was developed, which is ready for commissioning. For that, you need to upload the finished project from the local server to the hosting.

Hosting is a service that allows you to host a website on the Internet. It is saved and a suitable server for it. Moreover, this site will be freely available at any time, any day, while this hosting is active.

To upload the site to the server, Fornex virtual hosting was used [15].

This hosting has quite reasonable prices, and at the same time has a user-friendly interface and detailed system statistics.

After registering and creating a new domain, you can start uploading project files to the server. This procedure was done using the Filezilla app.

### Conclusions

The work has developed a social network that performs the main functions of the most popular social networks, namely: publishing new posts, adding and removing other participants from the friends list, personal correspondence with any participant.

Particular attention is paid to the location of the video feed on the social network.

In the process of creating the project, the reasons for the success of this system type were considered. Using the example of the three most popular representatives, the main secrets that made social networks popular were considered.

Thanks to the analysis carried out, network layouts were developed that make the interface the most user-friendly and have all the necessary windows in the most convenient access. Also, the developed database has all the necessary fields for the functioning of the system.

During the development of the software product, modern web technologies were selected and justified, allowing the creation of interactive web pages.

With the help of modern resources, the project was uploaded to virtual hosting, which makes the social network ready for use on the Internet.

### REFERENCES

1. Маркетер [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://marketer.ua/ua/the-most-popular-social-networks-in-the-world/> (accessed July 15, 2020).
2. Igroup. Соціальні мережі [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://igroup.com.ua/seo-articles/sotsialna-merezha/> (accessed May 25, 2021).
3. Патюков, С.В. Социальная сеть: понятие, история возникновения, современное положение дел / С.В. Патюков, Е.В. Коврига. — Текст : непосредственный // Юный ученый. — 2017. — № 2 (11). — С. 75-77. — URL: <https://moluch.ru/young/archive/11/873/> (дата обращения: 16.02.2021).
4. Iklife [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://iklife.ru/socialnye-seti/instagram/chto-takoe-instagram-i-zachem-on-nuzhen.html>.
5. Igroup [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://igroup.com.ua/seo-articles/facebook/>.
6. WebsiteHostingRating.com [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.websitehostingrating.com/facebook-statistics/>.
7. Soeded [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <http://www.seoded.ru/istoriya/internet-history/istoriya-vkontakte.html>.
8. Gallardo D. (2020). Easy navigation for your videos with Chapters. Vimeo blog. / [Electronic resource] - Access mode: URL: <https://vimeo.com/blog/post/easy-navigation-for-your-videos-with-chapte>
9. Основи UML [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://prog-cpp.ru/uml-classes/>
10. АРЕПС. Що таке база даних? [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <http://apeps.kpi.ua/shco-take-basa-danykh>
11. Рідний Дім [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <http://ridnydim.narod.ru/>
12. Webformyself. Що таке Bootstrap [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://webformyself.com/chto-takoe-bootstrap/>
13. Технологія AJAX [Електронний ресурс] // АСОІ. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <http://ua-referat.com/AJAX>.
14. LibMDPU. Тестування програмного продукту [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <http://lib.mdpu.org.ua/e-book/vstup/L11.html>.
15. Fornex [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://fornex.com/>.

Received (Надійшла) 22.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.08.2021

### Відео та аудіо контент - ефективні складові розробки соціальної мережі

А. С. Сімасв, Т. М. Деркач, Т. А. Дмитренко

**Анотація.** Розглянуто питання необхідності розробки соціальної мережі. Запропонована розроблена соціальна мережа для публікацій нових постів, додавання та видалення з списку друзів інших учасників, персональна переписка з будь-яким учасником. Особлива увага приділена питанням використання відеоконтента та визначені причини популярності відеоконтента. Для реалізації поставленої задачі запропоновано простий та зрозумілий для користувача дизайн. Розглянуті функції користувача у системи яка розробляється, для чого побудована діаграма прецедентів. Описана база даних соціальної мережі. Проаналізовано та обґрунтовано вибір мови програмування PHP, для реалізації поставленої задачі. Розглянуто особливості використання та переваги Open Server та фреймворка Bootstrap. Обґрунтовано використання при розробці соціальної мережі Ajax технології – технології розробки web-додатків. Описано роботу розробленої соціальної мережі зі сторони користувача та адміністратора. Особлива увага приділяється авторизації користувача в мережі, для безпеки сторінок. Надано результати тестування, для перевірки правильності роботи системи та відповідності її реалізації до вимог. Проведено завантаження проекту на віртуальний хостинг, що робить соціальну мережу готовою для використання в інтернеті.

**Ключові слова:** соціальна мережа, відеоконтент, фреймворк.

E. Skakalina

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

## SYNTHESIS TRENDS OF FORECASTING USING INDUCTIVE MODELING METHODS

**Abstract.** Modern development of computer technology and the possibility of implementing calculations in parallel allow to solve increasingly large-scale problems of numerical modeling. The development of multiprocessor computing and parallel computing makes it important to solve problems of optimization analysis. The optimization analysis is based on the mass solution of inverse problems when the defining parameters of the considered class of problems change in certain ranges. Thus, calculations of not only direct problems where it is necessary to model the phenomenon at the known initial data, but also calculations of inverse problems where it is necessary to define on what defining parameters there is this or that phenomenon become more and more demanded. This formulation requires multiple solutions of direct problems and solving the problem of optimization analysis and construction of predictive trends. Sets of multidimensional parametric data in the paper are considered as numerical solutions of the optimization problem. The construction of predictive trends is implemented on the basis of the group method of data handling as a direction of induction modeling. The methodology of visualization of results of calculation of parametric functions is realized. The scheme of Data Mining with application of methods of visualization by means of the Matlab software environment is described.

**Keywords:** multiparameter functions, inductive modeling, group method of data handling, visualization, trends, optimization of results, Matlab.

### Introduction

Statement of the problem of synthesis of forecast trends requires multiple solutions of direct problems and solution of the problem of optimization analysis.

The final solution of such problems are multidimensional arrays of discrete quantities that express the dependence of the desired function (control parameter) on the defining parameters of the problem. The thus obtained multidimensional numerical results require processing and analysis.

Initially, the methods of data analysis were focused in the course of historical development on the processing of the results of physical and engineering experiments, as well as on the processing of the results of statistical observations. Real physical experiments were conducted in three-dimensional space. Therefore, the methods designed to work with one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional results are well-established and well-known. With the development of computing power and algorithms, it has become possible to process huge arrays of observational data and experiments in various fields. Solutions of inverse and optimization problems became possible, which became multidimensional arrays that express the dependences of control parameters in the multidimensional space of defining parameters.

We needed tools to analyze data implemented not in three-dimensional but in multidimensional space.

Over the past decade, the analysis of multidimensional data has become one of the main areas of applied mathematics, actively developing and applied in almost all areas of research.

Multidimensional Data Analysis (MDA) is one of the most popular and sought-after interdisciplinary fields of knowledge and an active tool for the synthesis of various disciplines.

At first, the most intensive tools of AMD were developed in applied analytical chemistry. That is why there is another common name for AMD methods - Chemometrics [1]. Today, the study of multidimensional data is a key section of modern mathematical statistics,

analytical chemistry, environmental and geographical research.

MDA methods are used in econometrics in the analysis of financial and economic indicators, in psychometry in the analysis of the results of psychological surveys, in biology and medicine in the processing of observations [2]. When creating databases and developing DBMS methods and algorithms MDA are used to create matrix operators designed to process data placed in a multidimensional form [3].

One of the most well-known methods of analyzing multidimensional data is the principal components method and its generalization for nonlinear cases. Methods of analysis of multidimensional data are implemented in close relationship and interaction with the methods of factor and cluster analysis. In problems of mechanics of continuous media and computational physics, which involve optimization analysis of phenomena, the analysis of multidimensional data allows to find the optimal conditions for the occurrence of a physical phenomenon in the multidimensional space of the defining parameters of the problem.

There are many different definitions of AMD, dictated by the specific area and objectives of research, the algorithms used. In our case, where the source of multiparametric data functions are solutions to optimization problems and visualization of results, the following definition is used: This definition allows you to formulate the problem in a more general form and avoid the restrictions imposed by the use of specific methods solved by the problem and other similar factors.

The results of such calculations are multidimensional arrays, the dimension of which corresponds to the number of defining parameters. These arrays require processing and visual representation for data analysis. This requires a general scheme for working with such data.

### 1. Analysis of recent research and publications

Inductive modeling is a self-organizing process of evolutionary transition from primary data to explicit

mathematical models, reflecting the patterns of functioning of simulated objects and systems, which are implicitly contained in the available experimental, experimental, statistical data.

Inductive modeling (IM) allows you to select a model of optimal complexity from a given class of models to describe a limited set of experimental data. IM is effective when there is no or partial a priori information about a possible object model. This approach was proposed in the 80s by Acad. A.G. Ivakhnenko [4] and now IM is an integral part of Machine Learning and Data Mining technologies. The theory of inductive modeling based on the group method of data handling (GMDH) using the method of critical variances [5], allowed to explain the nature of the efficiency of GMDH as a method of constructing noise-tolerant models with minimal prediction error variance, and to solve the problem of optimizing [ ]. The two-criteria method of redefining the choice of the model using the criterion of non-displacement of errors [7] allows to eliminate the ambiguity of the choice of the optimal model.

The principles of designing and implementing high-performance search algorithms of GMDH on the basis of recurrent calculations [8], procedures of parallelization of operations [9] and sequential selection of informative variables [10] allow to increase the dimensionality of the solved problems. The principles of constructing hybrid architectures of iterative algorithms of GMDH as a generalization of algorithmic structures of multirow, relaxation and combinatorial types allowed to develop a generalized iterative algorithm of GIA GMDH [11] as a neural network with active neurons in the form of COMBI algorithm for automatic detection. The Department of Information Technologies of Inductive Modeling of the International Research and Training Center for Information Technologies and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine has developed theoretical and practical foundations and algorithms:

- generalized relaxation iterative algorithm GRIA GMDH, based on the use of high-speed recurrent calculations and matrices of normal equations, which allows to solve problems of inductive modeling of ultra-large dimension [12];

- theoretical bases of a fundamentally new class of enumerative and iterative algorithms of GMDH with the use of recurrent-parallel calculations on cluster systems [13] as a basis of highly efficient intelligent technologies of inductive modeling;

- principles of designing technologies of intelligent modeling of complex systems based on the use of knowledge bases, inductive data analysis tools and intelligent user interface [14]. Such technologies should have three main tool levels: autonomous modeling from an existing database; built-in modeling as part of a real-time control system; complex modeling of a complex system to identify the optimal modes of its operation and critical scenarios;

- theoretical principles and tools for forecasting interconnected socio-economic processes based on statistical data in the class of discrete dynamic models of vector autoregression [15];

- principles of hybridization of GMDH search algorithms and genetic algorithms, on the basis of which the COMBI-GA search algorithm was developed [16]

## 2. Statement of the research problem

It is necessary to synthesize a multi-parameter function that will display the production data of the main trends over the years of the agricultural holding, use the algorithm of the process of optimization and visualization of decision-making results. Agricultural production was chosen as the subject area.

To solve the optimization problem, you must first choose a mathematical method that would lead to the final results with the lowest computational costs, or to obtain the largest amount of solution search information, which widely uses the method of minimizing and maximizing linear and nonlinear functions.

In the search for a solution, the problems of processing and analysis of multidimensional volumes of numerical information given in the form of multidimensional arrays are considered. Multiparametric data are considered in the work as numerical solutions of the optimization problem and visualization of the results of parametric functions.

The function of the synthesized mathematical algorithm should be optimized, then display the visualization of trends, for this purpose the mathematical software environment MATLAB was used.

Matlab Numerical Analysis Software Package, which has an Optimization Toolbox, designed to solve complex mathematical problems, contains programs of well-known methods for minimizing and maximizing linear and nonlinear optimization functions for reliability, quality for various applications and tasks for implementing various construction methods. graphs [17].

The practical use of the mathematical method is largely determined by the formulation of the optimization problem, as well as the used mathematical model of the object of optimization, the characteristics of a particular subject area.

## 3. Basic material and results

The choice of a method of synthesis of forecast trends is largely determined by the formulation of a specific optimization problem, as well as a mathematical model of the object of optimization [18]. The general scheme of analysis of numerical data is given in Fig. 1.

The calculation must be implemented through a multiparameter function that will display the production data of the main trends of the agroholding over the years, the algorithm of the process of visualization and optimization of the program, which widely uses the method of minimizing and maximizing linear and nonlinear functions Optimization Toolbox, which is designed to solve complex mathematical problems of optimizing the cost of reliability, quality for various applications and the implementation of various methods of graph visualization.

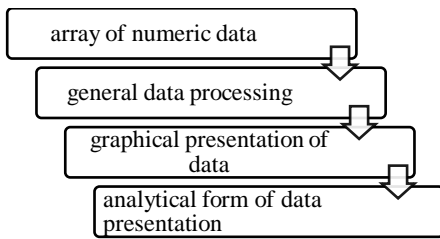


Fig. 1. General scheme of numerical data analysis

MATLAB is a high-level language of technical calculations, an interactive algorithm development environment and a modern data analysis tool. MATLAB in comparison with traditional programming languages (C / C ++, Java, Pascal, FORTRAN) allows to reduce time of the decision of typical problems and considerably simplifies development of new algorithms [18]. MATLAB is the basis of the entire family of MathWorks products and is the main tool for solving a wide range of scientific and applied problems in such areas as: object modeling and control systems development, communication systems design, signal and image processing, signal measurement and testing, financial modeling, computational biology, etc.

The MATLAB core allows you to easily work with matrices of real, complex and analytical data types. Contains built-in functions of linear algebra (LAPACK, BLAS), fast Fourier transform (FFTW), functions for working with polynomials, functions of basic statistics and numerical solution of differential equations. All built-in MATLAB kernel functions are designed and optimized by specialists and work faster or in the same way as their equivalent in C / C ++, which is a programming language for engineering and mathematical calculations. Large library of functions simplifies work (including graphical display of data). Key features:

- platform independence, high-level programming language focused on matrix computing and algorithm development
- Interactive environment for code development, file and data management
- Functions of linear algebra, statistics, Fourier analysis, solutions of differential equations, etc. Quantitative results of forecasting the main production and financial performance of agricultural holdings are shown in table 1.

Table 1 – Generalized results of forecast trends

Characteristic	The range of deviation of the predicted value from the control (%)
The cost of goods sold	0,23 – 5,08
Gross profit	0,64 – 3,77
Net profit	3,30 – 9,96
Costs	0,74 – 5,06

- Rich visualization tools, 2-D and 3-D graphics
- Built-in UI development tools for creating complete applications on MATLAB
- Tools for integration with C / C ++, code inheritance, ActiveX technology
- Access to .NET features.

MATLAB has more than a million production users and scientists. The price of the basic commercial version without tools is about 2000 dollars. US dollars and only 100 dollars. USA for educational institutions with a minimum set of tools.

MATLAB provides the user with a large number of data analysis functions that cover almost all areas of mathematics, including:

- ♦ Matrices and linear algebra - matrix algebra, linear equations, eigenvalues and vectors, singularities, matrix factorization and more.
- ♦ Polynomials and interpolation - roots of polynomials, operations on polynomials and their differentiation, interpolation and extrapolation of curves
- ♦ Mathematical statistics and data analysis - statistical functions, statistical regression, digital filtering, fast Fourier transform and others.
- ♦ Data processing - a set of special functions, including graphing, optimization, zero search, numerical integration and more.
- ♦ Differential equations - solution of differential and differential-algebraic equations, differential equations with delay, equations with constraints, equations in partial derivatives and more.
- ♦ Sparse matrices - a special data class of the MATLAB package used in specialized applications.
- ♦ Integer arithmetic - performing integer arithmetic operations in the MATLAB environment.

MATLAB got its name from MATrix LABoratory, which was founded in the late 1970s by Clive Moler, who later became head of the Department of Computer Science at the University of New Mexico. He designed it to give his students access to LINPACK and EISPACK without having to master Fortran. MATLAB soon became popular at other universities and attracted the attention of applied mathematicians. Engineer John Little fell in love with this product when he visited Moller at Stanford University in 1983. Predicting MATLAB's commercial success, he joined Moller and Steve Bangert. They rewrote MATLAB in C and founded.

The MathWorks in 1984. The rewritten libraries became known as JACKPAC. Apart from the recognition of teachers of linear algebra and numerical analysis, MATLAB has been recognized de facto by specialists in working with digital images (eg tomography).

MATLAB supports the creation of applications with graphical user interface properties. MATLAB includes a GUIDE (GUI development environment) for graphical design of graphical user interfaces. Visualization of imported data in the MATLAB environment is shown in Fig. 2. Visualization of forecast trends for the years 2019 - 2020 is shown in Fig. 3,. 4. All modifications of GMDH for autoregressive and distributive lag models demonstrate high accuracy of the forecast.

The best accuracy is not clear GMDH, and GMDH with fuzzy inputs. In addition, their advantage over clear GMDH is that they do not use MNCs and are not sensitive to the poor conditionality of the matrix of input factors and autocorrelation of random variables, which is so important for autoregressive models.

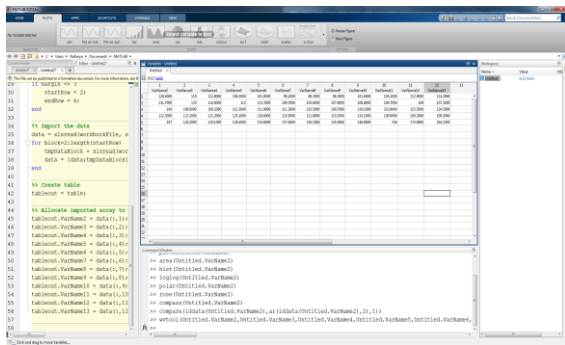


Fig. 2. Imported data

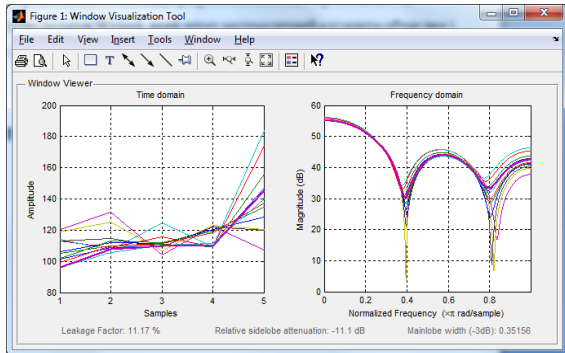


Fig. 3. Graphs of trends in the optimization of multiparameter functions for 2019

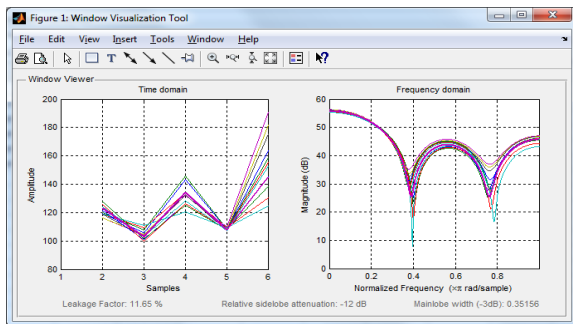


Fig. 4. Graphs of trends in the optimization of multiparameter functions for 2020

The basic two-stage methodology for the synthesis of forecast trends using the method of group consideration of arguments is shown in Fig. 5. At the first stage the synthesis of forecast trends with the use of inductive modeling is realized [19,20]. The second stage is the visualization of numerical trends in the MATLAB software environment.

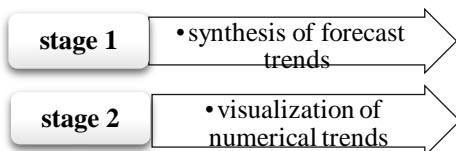


Fig. 5. Methodology of synthesis of forecast trends using the Group method of data handling

**Conclusions**

Taking into account the formulated input requirements, a multiparameter function was

implemented and optimized to solve the problem of optimizing the results of the main gross trends of the agricultural holding by years. Any complex system consists of separate simpler subsystems (elements). Therefore, naturally, solving the problem of multiparametric optimization for the system as a whole, to set and solve the problem of multiparametric optimization for its individual subsystems. At the same time coordination of optimality of subsystems according to their purpose and communications existing between subsystems should be carried out.

The set of system quality indicators can be considered as a vector, so multiparameter optimization is also called vector.

To solve the problems of multiparameter optimization, certain conditions must be provided. In particular, it should be possible to change, within certain limits, independent variables that affect quality criteria.

Any independent variable that can be changed within certain limits and that has some effect on all quality criteria or only some of them, is called a controlled change.

This terminology is in a sense consonant with the terminology of management theory. The set of all controlled variables can be considered as a control vector.

It corresponds to the point of n-dimensional control space. The dependence of quality criteria on managed variables is some reflection of the management space on the goal space.

An effective compromise is a set of all target points that cannot be further and evenly improved within the available management capabilities. Thus, this includes all points that are incomparable with each other in the sense of improving or deteriorating the control effect.

When implementing the derivation of optimization data in the price indices of industrial producers and sales of agricultural products of the agricultural holding.

The optimal search for the best solutions was carried out, which significantly improves the value of the system efficiency criterion. Thesis examines the theoretical issues of optimization of multiparameter functions, production data by years of the main trends of the agroholding to optimize results, statistical decision rules with procedures for solving the multiparameter function for calculating statistics of agroholding trends and effective management decisions.

The results of the study can be used for further research on the synthesis of forecast trends and optimization of modeling results by year of production of agricultural enterprises and decision-making. A numerical experiment was performed to process the actual input data for multiparameter functions on the price indices of industrial producers and the realization of agricultural prices of gross trends by years. Visualization of forecast trends with the help of MATLAB software environment is performed. Predicting trends are synthesized using the method of group consideration of arguments, which is the direction of inductive modeling, which shows the full adequacy of the proposed methodology for the task.

## REFERENCES

1. Чарльз Генрі Едвардс, Девід Е. Пенні. Диференціальні рівняння і проблема власних значень: моделювання та обчислення за допомогою Mathematica, Maple і MATLAB Differential Equations and Boundary Value Problems: Computing and Modeling. - 3-е изд. - М.: «Вільямс», 2007. - 397 с, ISBN 978-5-8459-1166-7.
2. С.П. Ігліні. Математичні розрахунки на базі Matlab. Видавництво "BHV-Санкт-Петербург" 2005р. 640 с.
3. Є.Р. Алексєєв, О.В. Чеснокова. Рішення задач обчислювальної математики в пакетах Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9. Серія: Самовчитель. Видавництво: НТ Пресс, 2006р. 496 с. ISBN 5-477-00208-5.
4. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. – Киев: Наук. думка, 1982. – 296 с.
5. Samoilenko O., Stepashko V. A method of Successive Elimination of Spurious Arguments for Effective Solution of the Search-Based Modelling Tasks // Proc. of the II Int. Conf. on Inductive Modelling, Sept. 15-19, 2008, Kyiv, Ukraine. – IRTC ITS NASU, Kyiv, 2008. – P. 36-39.
6. Stepashko V., Bulgakova O. Generalized Iterative Algorithm GIA GMDH // Proc. of the 4th Int. Conf. on Inductive Modelling ICIM-2013, Sept. 16-20, 2013, Kyiv, Ukraine. – Kyiv: IRTC ITS NASU, 2013. – P. 119-123.
7. Yefimenko S., Stepashko V. Intelligent Recurrent-and-Parallel Computing for Solving Inductive Modeling Problems // Proc. of 16th Int. Conf. on Computational Problems of Electrical Engineering CPEE'2015, Lviv, Ukraine, September 2-5, 2015. – Lviv: LNU, 2015. – P. 236-238.
8. Степашко В.С. Концептуальные основы интеллектуального моделирования // УСиМ. – 2016. – № 4. – С. 3-15.
9. Ефименко С.Н. Построение систем прогнозных моделей многомерных взаимосвязанных процессов // УСиМ. – 2016. – № 4. – С. 80-86.
10. Stepashko V., Moroz O. Hybrid Searching GMDH-GA Algorithm for Solving Inductive Modeling Tasks // Proc. of the 1st IEEE International Conference on Data Stream Mining & Processing, 23-27 August 2016, Lviv, Ukraine. – P. 350-355.
11. Self-organizing methods in modeling: GMDH type algorithms / Ed. S.J. Farlow. – New York, Basel: Marcel Decker Inc., 1984. – 350 p.
12. Bodyanskiy Ye., Zaychenko Yu., Pavlikovskaya Ye. The Neo-Fuzzy Neural Network Structure Optimization Using the GMDH for the Solving Forecasting and Classification Problems / Proc. of the 3rd Int. Workshop on Inductive Modeling IWIM-2009, 14-19 Sept. 2009, Krynica, Poland. – Prague: Czech Techn. Univ., 2009. – P. 100-107.
13. Булгакова О.С., Зосімов В.В., Степашко В.С. Програмний комплекс моделювання складних систем на основі ітераційних алгоритмів МГУА з можливістю мережевого доступу // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2014. – № 1. – С. 43-55.
14. Павлов А.В. Проектирование системы автоматизированной структурно-параметрической идентификации // Индуктивное моделирование сложных систем. – Вып. 7. – К.: МННЦ ІТС НАНУ, 2015. – С. 202-219.
15. [Stepashko V., Samoilenko O., Voloschuk R. Informational Support of Managerial Decisions as a New Kind of Business Intelligence Systems. – Computational Models for Business and Engineering Domains / G.Setlak, K.Markov (Eds.). – Rzeszow, Poland; Sofia, Bulgaria: ITHEA, 2014. – P. 269-279.
16. Zosimov V., Stepashko V., Bulgakova O. Inductive building of search results ranking models to enhance the relevance of the text information retrieval // Proc. of the 26th Intern. Workshop “Database and Expert Systems Applications”, 1-4 Sept., Valencia, Spain / Ed. by Markus Spies et al. – Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2015. – P. 291-295.
17. Оленєв М.М., Печонкін Р.В., Ченців А.М. Паралельне програмування в MATLAB і його додатки. М.: ВЦ РАН. 2007. 120 с. - ISBN 5-201-09865-7
18. E. Skakalina. INFORMATION TECHNOLOGY FOR BUILDING A MODEL OF FINANCIAL FORECASTING / E.Skakalina // Proceedings of the 16th INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE INFORMATION TECHNOLOGIES AND MANAGEMENT 2018. April 26-27, 2018. ISMA University, Riga, Latvia, P.195-196.
19. Optimization Toolbox - Оптимізація [Електронний ресурс]. - 2021. - Режим доступу: <http://matlab.exponenta.ru/optimiz/index.php>
20. Skakalina E. Investigation of intelligent technologies for formation forecasting models / Elena Skakalina // International Journal of Engineering & Technology.- 2018.- 7(3.2 ). – P.413-418. DOI: 10.14419/ijet.v7i3.2.14563

Received (Надійшла) 15.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.08.2021

**Синтез прогнозних трендів із застосуванням методів індукційного моделювання**

О. В. Скакаліна

**Анотація.** Сучасний розвиток обчислювальної техніки і можливість реалізації обчислень в паралельному режимі дозволяють вирішувати все більш масштабні завдання чисельного моделювання. Розвиток багатопроцесорний обчислювальної техніки та паралельних обчислень робить актуальним вирішення задач оптимізаційного аналізу. Оптимізаційний аналіз заснований на масовому рішенні зворотних задач при змінюються в певних діапазонах визначальних параметрах розглянутого класу задач. Так, все більш затребуваними стають розрахунки не тільки прямих завдань, де потрібна моделювати явище при відомих вихідних даних, але і розрахунки зворотних задач, де необхідно визначити за яких визначальних параметрах виникає те чи інше явище. Така постановка вимагає багаторазового розв'язання прямих задач і рішення задачі оптимізаційного аналізу та побудови прогнозуючих трендів. В роботі розглядаються проблеми Data Mining багатовимірних обсягів числової інформації, заданих у вигляді багатовимірних масивів. Множини багатовимірних параметричних даних в роботі розглядаються, як чисельні рішення задачі оптимізації. Побудова прогнозуючих трендів реалізується на базі методу групового урахування аргументів як напрямку індукційного моделювання. Реалізована методологія візуалізації результатів обчислення параметричних функцій. Описана схема Data Mining із застосуванням методів візуалізації засобами програмного середовища Matlab.

**Ключові слова:** багатопараметричні функції, індуктивне моделювання, метод групового урахування аргументів, візуалізація, тренди, оптимізація результатів, Matlab.



S. Alyoshin, O. Haitan, O. Zyma

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

## THE CONSTRUCTIVE IMPLEMENTATION OF LIEBIG'S LAW OF THE MINIMUM IN THE PARADIGM OF SYNTHESIS OF A NEURAL NETWORK SUBJECT STATE CLASSIFIER

**Abstract.** Liebig's law of the minimum is one of the fundamental laws in ecology, which states that the most significant factor for the organism is the factor that deviates most from its optimal value and at the same time most significantly limits the successful life of the organism, being the weakest link in the chain of its ecologic needs. Therefore it is very important to identify the weak link in the life of organisms while classifying and predicting ecologic conditions. However, taking into account ambiguity of the factor influence, compensation of the influence of some factors by others, as well as the synergistic effect of influencing the result, Liebig's law should be considered as a law operating under conditions of a high degree of uncertainty, which makes it difficult to apply it effectively in some cases. **The purpose of the article** is to find a deterministic relationship of input factors with an objective function (a set of indicators of the study subject state), which involves the synthesis of an ensemble of neural network models with forced learning on retrospective data examples, to ensure their adequacy, performance and accuracy, to create an algorithm for modifying the value of input factors for a given class the state of the study subject for a pragmatic, highly effective use of Liebig's law in practice. In the paper it is considered a technology for quantitative evaluation of the determining force of influencing factors on the organism state based on the synthesis of an ensemble of adequate models of the relationship between the space of input factors and the state of the study subject. A quantitative differential evaluation of the influence of input factors on the state of the subject was carried out; the adaptation of input factors to the objective state of the study subject was algorithmized. It expands the possibilities of practical application of the Liebig's law of the minimum, both in the quantitative evaluation of problematic ecologic factors, and in their variations to achieve the required state of the subject. The invariance of the developed technology for the quantitative evaluation of the determining force of the input factors to the features of the subject area has been established, which makes it possible to extend the obtained results to the animal and plant world and emphasizes the universality of the provisions of Liebig's law.

**Keywords:** Liebig's law of the minimum, neural network, ensemble of neural network models with forced learning.

### Introduction

Liebig's law of the minimum, formulated by J. Liebig in 1840, is one of the fundamental laws in ecology. It states that the most significant factor for the organism is the factor that deviates most from its optimal value and at the same time most significantly limits the successful life of the organism being the weakest link in the chain of its ecological needs [1, 2]. Therefore, it is very important to identify the weak link in the life of organisms while classifying and predicting of the ecologic conditions. However, it should be noted that the effect of a certain factor on various body functions is ambiguous: optimum for some processes is not the optimum for others, and vice versa. In addition, the absence or deficiency of some ecologic factors can be compensated by another factor with similar influence. Sometimes there is a synergistic effect of influencing the result and not always in the direction of increasing the positive effect. This allows us to state that Liebig's law should be considered as a law operating in conditions of a high degree of uncertainty, which makes it difficult to apply it effectively in practice in some cases [2-4]. Thus, for its pragmatic, highly effective use in practice, it's necessary to develop a technology for finding the deterministic dependence of the influencing factors on the body state, convert this dependence into a strict analytical and publicly available form and develop

an algorithm for fast and reliable modification of the set of input factors to bring the body to the objective (optimal) state.

**Purpose of the study** is to develop a technology for evaluation of the influence of factors on the body state based on the synthesis of an ensemble of adequate models of the relationship between the space of input factors and the state of the study subject, to provide a quantitative evaluation of this influence and to make algorithm of the adaptation of the input factors to the objective state of the study subject. This expands the possibilities of applying Liebig's law of the minimum, both in quantitative evaluation of problematic ecologic factors and in their variations to achieve the required state of the subject.

**Task** is to find a deterministic relationship between input factors and an objective function (set of indicators of the state of the study subject), which involves the synthesis of an ensemble of neural network models with forced learning on examples of retrospective data, to ensure their adequacy, performance and accuracy, to create an algorithm for modifying the value of input factors for a given class of state of study subject [3-7].

### Results of research

Let's establish the deterministic relationship of input ecologic factors with the state of the subject in the

classical way, using the Kolmogorov-Arnold theorem about the representation of a function of several arguments through the sum of the compositions of functions of one variable [3], taking into account its analytical transformation to the Hecht-Nielsen neural network format [3-4]:

$$y(x) = \alpha \sum_{i=1}^H v_i (w_{i1}x_1 + w_{i2}x_2 + \dots + w_{in}x_n + u_i), \quad (1)$$

where  $H$  is training sample dimension;  $\alpha, v$  are internal parameters of the neural network;  $n$  is number of neurons;  $w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}$  are neuron weights. Then the adequacy of this statement (1) is achieved by forced training of the neural network on a representative sample of examples.

Next, it is necessary to calculate the determining force of the input ecologic factors.

It is appropriate to solve this problem using a practical evaluation of the Kharkevich information measure [3,4], with the justification that any purposeful activity is based on information that can be used for differential factor analysis (of biological systems in our case). According to A.A. Kharkevich, there is a deterministic relationship of information with the state and purposeful behavior of the study object. And the measure of the conditionality of the information value is determined by the probability of achieving the objective from the received information at multifactorial influence on the study object [3,4]:

$$I_i^j = \log_2(P_i^j / P^j), \quad (2)$$

where  $P^j$  and  $P_i^j$  are the probabilities of objective achieving, respectively, before and after receiving information from the  $i$ -th factor;  $I_i^j$  is a quantitative measure of the determining force of the  $i$ -th factor to bring the study object into the  $j$ -th state.

The choice of this measure is due to the meaning of the variables  $P_i^j$  and  $P^j$ , fixing, respectively, the probability of the object's transition to the  $j$ -th state under the influence of the  $i$ -th factor and the probability of an arbitrary transition of the object to the same state. Expression (2) directly determines quantity of information  $I_i^j$  that affects the object at presence of  $i$ -th factor. When quantity of information  $I_i^j > 0$ , the  $i$ -th factor contributes to the transition of the object into the  $j$ -th state; when  $I_i^j < 0$ , it prevents this transition; when  $I_i^j = 0$ , it does not affect the transition in any way, the object is indifferent to the control action.

In the context of Liebig's law, this property implies the ability to evaluate quantitatively the strength and direction of ecologic factors through the magnitude and sign of the information conditioning them. At the same time, there are no fundamental restrictions on the nature of the study object, the determining force and the number of influencing factors, which is essential when justifying

the application of this approach to modeling the scheme for implementing Liebig's law of the minimum. In this case, the decision-maker has information about the determining force of all input factors without exception.

With this approach, the practical solution of this problem is reduced to minimizing the error function of an artificial neural network during its forced training on the examples of the set of initial historical data in a given subject area [3-7]. In practice, the problem of synthesizing of an adequate neural network is solved expertly on the platform of a standard package of technical data analysis [8].

Thus, the algorithm for implementing Liebig's law of minimum can be represented as follows: the states of the study subject, as images, are described in the language of their informative features, transformed into a representative sample of historical precedents, fed to the input of a neural network with a variable structure, teaching methods, initial conditions, etc. [4]. After training the ensemble of models, the best one by performance, accuracy and speed is selected from it. If necessary, a separate application is created, for example, in the "macro" option implementation mode.

Expanding the capabilities of Liebig's law, it is appropriate to implement the option of modifying the values of input factors for a given state of the study subject. This is achieved by forming a residual (error) function between the current and target state of the study subject of the form:

$$E(X) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (y_i(x) - y_{iz})^2, \quad (3)$$

where  $y_i(x)$  and  $y_{iz}$  are, respectively, the current and objective vectors of the state indicators of the study subject. Next, the gradient of this error is calculated by the vector of input ecologic factors and the modification of the space of input factors is based on the following computational procedures [3]:

$$X^{t+1} = X^t - \eta_1 \cdot \text{grad } E(X^t), \quad (4)$$

where

$$\text{grad } E(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1}(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \frac{\partial f}{\partial x_2}(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \dots \\ \frac{\partial f}{\partial x_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{pmatrix} \quad (5)$$

are components of residual function gradient.

Instrumental implementation of these computational procedures is carried out by one of the known methods, for example, by the method of synthesis of a dual neural network [3, 4]. In the process of neural network model training two types of gradient of a complex function are implemented: first one is formed from the partial derivatives of the network error function by its

weight coefficients; the second one is formed from the partial derivatives of the mismatch function of the current and objective states according to the set of input control factors [7]. The functional diagram of the process is shown in Fig. 1.

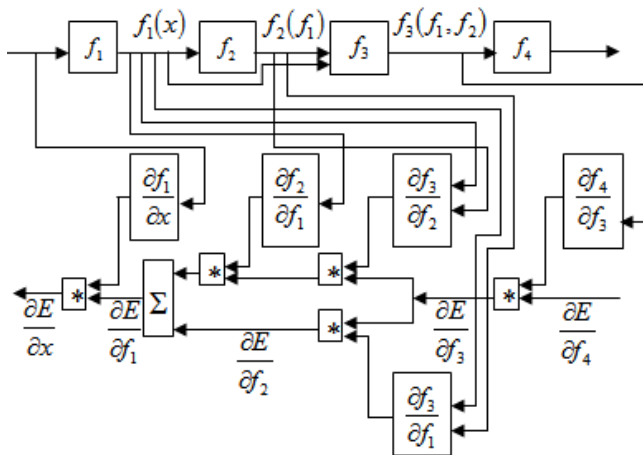


Fig. 1. The functional diagram of the synthesis of a dual neural network

The current state  $y_i(x)$  is instrumentally estimated in the process of solving of  $y_i(x)$  classification problem arising from a more general formal problem of pattern recognition according to the following rule:

$$G [H(\omega, \{\omega_g\})], \Rightarrow Sup, \quad (6)$$

where  $[H(\omega, \{\omega_g\})]$  is the rule for assigning a subject to the appropriate class (k),  $\omega_g \in \Omega_k$ ,  $\{\omega\}$  is set of objects in the class. Solution of (6) is achieved by optimizing of rule (6) using one of the well-known methods [3, 4].

In order to form a training sample from the database, it was used real information about the number of sick patients, depending on the ecologic load in the region (Fig. 2). Based on this set, a training sample was formed with the allocation of three classes based on their description in the space of 10 features (ecologic factors) (Fig. 3).

The neural network training procedure is implemented on the platform of a standard package of technical data analysis by a neural network module in the “Decision Wizard” and “Network Designer” modes with a variety of training methods, types of models, sample power, dimension of input factors, activation functions, architecture and network complexity [3, 8].

In our example, the performance acceptable for practice (97%) in the classification mode was achieved within (50-70) learning epochs, which is clearly illustrated by the table of characteristics of synthesized neural networks and training graphs for the best models from the entire saved ensemble (Fig. 4, 5)/

The stable convergence of the iterative process and the performance acceptable for practice on the training and test sets, as well as the test control of the user's observations by the values of the user corresponding to the true classes [3,4] allow us to assert that the synthesized models adequately implement the analytical deterministic dependence (1) of the subject's states on the set of input ecological factors. Thus it is possible to convert efficiently the results of the approximation of the sought functional dependence (1) into an evaluation of the determining strength of each factor on class of the subject's state. This task was instrumentally solved by activating the sensitivity evaluation option of the neural network module of the technical analysis package [8], and the result is presented in (Fig. 6) for the network with the best performance from the final ensemble of models (Fig. 4).

Код места	Числ. Насел. Тис.чел. овок	Число обрац.	%	NO	SO2	CO	Cn(H2O)n	MnO2	NH3	SiO2	C6H5C H3	CH3(CH2) 3OCH	CH3C OCH3
1	1317.2			4841,78	11348	7253,4	589,29	2,05	1111	480,97	79,14	19,81	33,27
2	296.2	13277	4,48	2836,73	4748	2504,7	31,31	0,36	1006	20,09	37,44	10,04	26,66
3	21.0	11971	57,1	30,31	567,7	189,59	4,65	0,01	17	3,47	0,09	0,02	0,03
4	69.7	8959	12,85	172,81	290	628,68	15,23	0,11	2,68	107,87	12,29	1,61	1,06
5	88.7	11996	13,52	120,1	420	361,32	8,97	0,17	7,3	11,02	1,38	0,36	0,66
6	49.3	14877	30,18	30,59	208,9	309,83	15,13	0,03	2,6	8,37	1,95	0,4	0,7
7	42.6	15502	36,39	19,74	171,9	85,9	2,89	0,01	3,08	4,65	0,5	0,19	0,07
8	45.6	12423	27,24	45,89	66,99	95,42	6,25	0,01	4,1	1,37	0,07	0,04	0,01

Fig. 2. Fragment from the data set of the ecological load of the regions

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Пер1	Пер2	Пер3	Пер4	Пер5	Пер6	Пер7	Пер8	Пер9	Пер10	НовПер
2836,73	4748,08	2504,72	31,31	0,36	1005,71	20,09	37,44	10,04	26,66	1
30,31	567,72	189,59	4,65	0,01	17	3,47	0,09	0,02	0,03	3
172,81	289,97	628,68	15,23	0,11	2,68	107,87	12,29	1,61	1,06	1
120,1	419,96	361,32	8,97	0,17	7,3	11,02	1,38	0,36	0,66	1
30,59	208,9	309,83	15,13	0,03	2,6	8,37	1,95	0,4	0,7	2
19,74	171,92	85,9	2,89	0,01	3,08	4,65	0,5	0,19	0,07	3
45,89	66,99	95,42	6,25	0,01	4,1	1,37	0,07	0,04	0,01	2
45,06	569,2	218,76	2,63	0,01	5,96	30,35	1,34	0,12	0,06	2

Fig. 3. Fragment of a training sample with 10 variables and 3 classes

Итоги моделей (Таблица)									
N	Архитектура	Производительность обуч.	Контр. производительность.	Тест. производительность.	Алгоритм обучения	Функция ошибки	Ф-я актив. скрытых нейр.	Ф-я актив. выходных нейр.	
2	MLP 10-8-3	99,00498	100,0000	97,61905	BFGS 75	Энтропия	Гиперболическая	Софтмакс	
3	MLP 10-8-3	84,07960	92,8571	76,19048	BFGS 16	Энтропия	Гиперболическая	Софтмакс	
4	MLP 10-8-3	97,51244	92,8571	90,47619	BFGS 66	Энтропия	Гиперболическая	Софтмакс	
5	MLP 10-8-3	97,01493	97,6190	95,23810	BFGS 58	Энтропия	Гиперболическая	Софтмакс	
6	MLP 10-8-3	96,51741	92,8571	88,09524	BFGS 76	Энтропия	Гиперболическая	Софтмакс	

Fig. 4. The characteristics of the ensemble of synthesized models

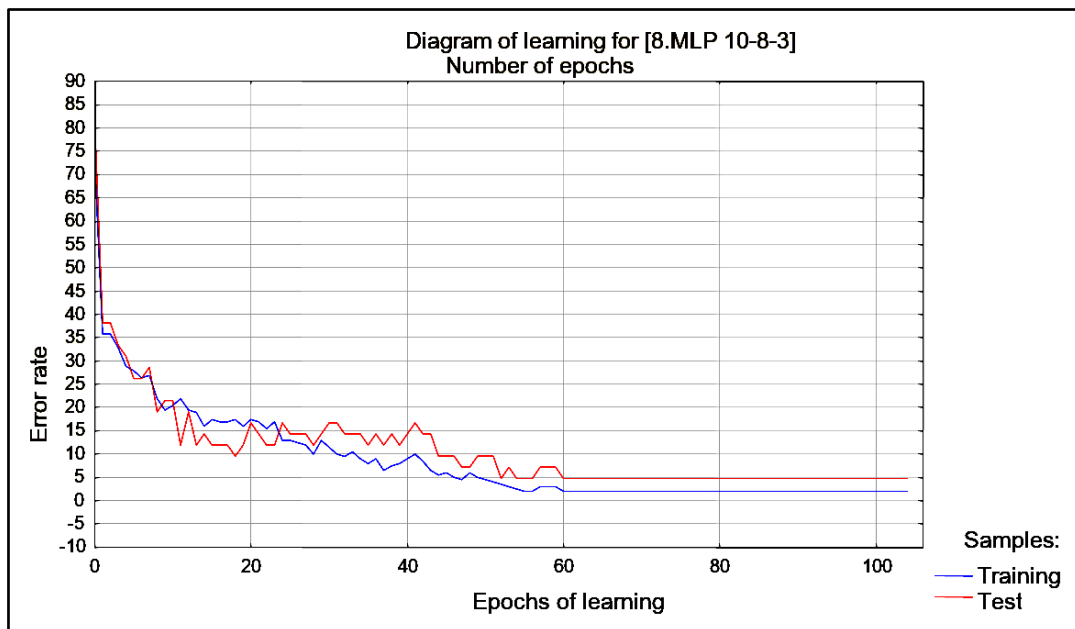
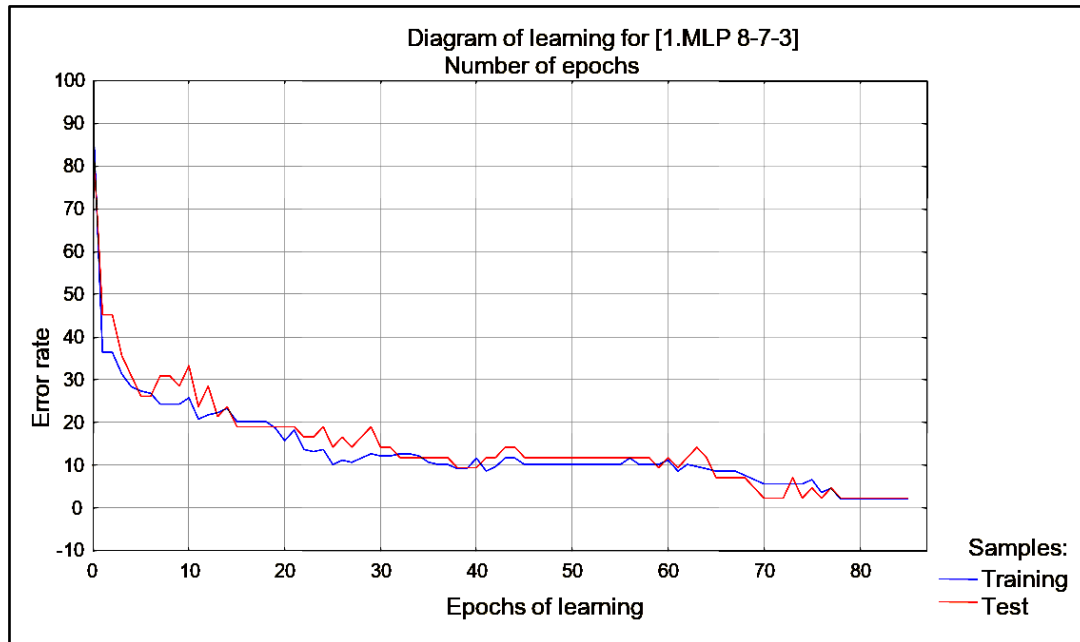


Fig. 5. Diagrams of convergence of the learning process under different initial conditions

Сети	Чувствительность (Таблица данных1)									
	Выборки: Обучающая									
	Пер10	Пер1	Пер3	Пер5	Пер6	Пер7	Пер8	Пер4	Пер9	Пер2
6.MLP 10-8-3	79,07091	38,29908	32,07745	28,77438	28,66677	18,06126	16,18869	14,53044	7,581324	6,227305

Fig. 6. Results of evaluation of the relative sensitivity of input factors

The higher the sensitivity of the factor, the more  $I_i^j$  – quantitative measure of the determining force of the  $i$ -th factor to transfer the study object into the  $j$ -th state according to expression (2).

This is the solution of the problem of constructive implementation of the Liebig's law of minimum, when a differential quantitative evaluation of the determinative force of each factor on the state of the study object is obtained.

After that, it is not difficult to select expertly the user values for a given state of the subject or automatically activate an algorithm for search of the required ratio of factors to ensure the objective state, implementing a functional scheme for the synthesis of a dual neural network (Fig. 1).

In this case, Liebig's law acquires an additional property: not only to fix the degree of influence of each factor on the study object, but also to purposefully change the state of this object by expert or program modification of the values of the input set of factors.

## Conclusion

It was developed a technology for quantitative evaluation of the determining force of influencing factors on the organism state based on the synthesis of an ensemble of adequate models of the relationship between the space of input factors and the state of the study subject. A quantitative differential evaluation of the influence of input factors on the state of the subject was carried out; the adaptation of input factors to the objective state of the study subject was algorithmized. It expands the possibilities of practical application of the Liebig's law of the minimum, both in the quantitative evaluation of problematic ecologic factors, and in their variations to achieve the required state of the subject. The invariance of the developed technology for the quantitative evaluation of the determining force of the input factors to the features of the subject area has been established, which makes it possible to extend the obtained results to the animal and plant world and emphasizes the universality of the provisions of Liebig's law.

## REFERENCES

1. Brodskiy A.K. Brief course of general ecology. SPb: Dean, 2000. – 224 p.
2. Khotuntsev Yu.L. Ecology and ecological safety. M.: Academia, 2004. – 480 p.
3. Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation, 2nd Edition. McMaster University, Ontario Canada, 1998. – 842 p.
4. Alosin S.P. Neyrosetevoy bazis podderzhki resheniy v prostranstve faktorov i sostoyaniy vysokoy razmernosti. – Poltava: Izd.«Skaytek», 2013. – 208 p.
5. Alyoshin S.P. Situatsionnyye tsentry bystrogo reagirovaniya: prinyatiye resheniy v srede neyroemulyatorov // Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zv'yazku – 2011. – № 1 (17). – Pp. 240 – 247.
6. Alyoshin S.P., Haitan O.M. Neural network modeling of the process of non-invasive screening-analysis of oxygen saturation providing the invariance to the impact of masking factors // Modern engineering and innovative technologies. – 2021. – Issue 16. Part 2. – P. 83 – 89.
7. Alyoshin S.P., Haitan O.M. Intelligent technologies of strategic enterprise management in the basis of artificial neural networks // Modern engineering and innovative technologies. – 2020. – Issue 14. Part 2. – P. 24 – 29.
8. Borovikov V.P. STATISTICA NN – Tekhnicheskoye opisanie. M.: Mir, 1999. – 239 p.

Received (Надійшла) 08.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.07.2021

### Конструктивна реалізація закону мінімуму Лібіха в парадигмі синтезу нейромережного класифікатора станів суб'єкта

С. П. Альошин, О. М. Гайтан, О. Є. Зима

**Анотація.** Закон мінімуму Лібіха – один з фундаментальних законів в екології, який гласить, що найбільш значущий для організму той фактор, який найбільше відхиляється від його оптимального значення і при цьому найбільш істотно обмежує успішну життєдіяльність організму, будучи найслабшою ланкою в ланцюзі його екологічних потреб. Тому під час класифікації та прогнозуванні екологічних умов дуже важливо визначити слабку ланку в житті організмів. Однак з огляду на неоднозначність впливу факторів, компенсацію впливу одних факторів іншими, а також наявність синергетичного ефекту впливу на результат, можна констатувати, що закон Лібіха слід розглядати як закон, що діє в умовах високого ступеня невизначеності, що в ряді випадків ускладнює ефективність його застосування на практиці. Мета статті – знайти детермінований зв'язок вхідних факторів з цільовою функцією (набором показників стану суб'єкта аналізу), що передбачає синтез ансамблю нейромережових моделей з примусовим навчанням на прикладах ретроспективних даних, забезпечити їх адекватність, продуктивність і точність, створити алгоритм модифікації значення вхідних факторів під заданий клас стану суб'єкта дослідження для прагматичного, високоефективного використання закону Лібіха на практиці. В роботі розроблена технологія кількісної оцінки детермінуючої сили факторів, що впливають на стан організму, на основі синтезу ансамблю адекватних моделей зв'язку простору вхідних факторів зі станом суб'єкта аналізу. Проведена кількісна диференціальна оцінка впливу вхідних факторів на стан суб'єкта, алгоритмізована адаптація вхідних факторів до цільового стану суб'єкта дослідження. Це розширює можливості практичного застосування закону мінімуму Лібіха, як у кількісній оцінці проблемних екологічних факторів, так і в варіаціях ними для досягнення необхідного стану суб'єкта. Встановлено інваріантність розробленої технології кількісної оцінки детермінуючої сили вхідних факторів до особливостей предметної області, що дозволяє поширити отримані результати на тваринний і рослинний світ та підкреслює універсальність положень закону Лібіха.

**Ключові слова:** закон Лібіха про мінімум, нейронна мережа, ансамбль нейронних мережових моделей з примусовим навчанням.

О. С. Волошкіна, А. В. Ковальова

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

## ВИРОБНИЧИЙ РИЗИК ДЛЯ БЕЗПЕКИ ПРАЦЮЮЧИХ НА ВІДКРИТОМУ ПОВІТРІ ВІД ТЕМПЕРАТУРНИХ УМОВ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

**Анотація.** В роботі представлено дослідження щодо аналізу впливу температурних показників атмосферного повітря урбанізованих територій на показники забруднення первинними та вторинними елементами та вплив якісного стану повітря на значення виробничого ризику. **Запропоновано** алгоритм системної ієрархічної моделі оцінки і класифікації виробничого ризику для робітників, які працюють на відкритому повітрі. Представлені залежності між вологовмістом в повітрі, температурними показниками та індексом забруднення AQIPM<sub>2,5</sub> в м. Києві за березень 2020 року. Взаємовплив температурних та якісних показників атмосферного повітря на здоров'я працівників на відкритих виробничих майданчиках на даних 2016 року представлено на прикладі окремих автомобільних шляхопроводів м. Києва, як одного з самих спекотних років останнього десятиліття. Представлені середньомісячні значення індексу забруднення атмосферного повітря аерозольними частками PM<sub>2,5</sub>мкм і виробничого ризику в залежності від вторинного формальдегідного забруднення внаслідок фотохімічних перетворень. **Розроблена** шкала класифікацій між кількісними показниками виробничого ризику та показниками забруднення атмосферного повітря. Ступінь небезпечності виробничого ризику по перевищенню концентрації найбільш небезпечного забруднювача може бути визначена даним підходом за референтним значенням окремого показника **Результати роботи** стануть в нагоді при розробці рекомендацій щодо захисту здоров'я працюючих в умовах поступового підвищення температурних показників, а також при розробці містобудівельних норм охорони праці на будівельних майданчиках

**Ключові слова:** виробничий ризик, забруднення повітря, температура, глобальні кліматичні зміни, шкала класифікацій ризику, алгоритм моделі ризику.

### Вступ

Характеристика впливу на виробничі умови підвищених температурних показників розглядалася в дослідженнях багатьох авторів [1, 2 та ін.]. Згідно списку професійних захворювань затвердженого наказом Міністерства охорони здоров'я України, Міністерства соціального захисту населення України, Міністерства праці України від 2 лютого 1995 р. N 23/36/9, працівники дорожньо-ремонтних організацій які працюють на відкритій території з автотранспортом, бітумом та щебнем, ручним трамбуванням або електроплитою піддаються таким захворюванням, як: гострі хронічні інтоксикації, токсичне ушкодження органів дихання, хвороби шкіри, алергічні захворювання, пневмосилокози, вібраційна хвороба, сенсоневральна приглухуватість та ін. За даними [3] зафіксовано, станом на 13.07.2016 при температурі повітря +31 С, температура асфальту складала +53 С. Слід зазначити, що температура в теплий період року може сягати понад +31 С, тим самим призводити до підвищення температури асфальту, оскільки діє вплив нагрівання асфальту від автотранспорту та збільшенню ризику захворюваності працівників на вище перераховані хвороби.

Державними санітарними нормами «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» (далі – ДСН 3.3.6.042-99) встановлено, що верхня межа температури на постійних робочих місцях (де працюючий проводить більше як половину свого робочого часу або не менш як 2-х годин поспіль), є температура +28 С. Роботу при температурі повітря вище 37° С віднесено до небезпечної. В даному випадку не рекомендується проводити роботи на відкритому майданчику. Останніми роками показники підвищеної температури фіксувалися різними системами моніторингових спостережень, як дер-

жавною, так і приватними. Самі високі перевищення температур атмосферного повітря відмічалися з грудня по березень місяці.

Максимальні значення температурних показників на протязі останніх років в м. Києві спостерігаються регулярно. Дата першого перевищення 30 °С спостерігалася регулярно вже в травні та на початку червня на протязі останнього десятиліття, а дата першого перевищення 35 °С 1 серпня 2010 року та 16 червня 2016 року. Що стосується вимірів поточного року, то за середньої температури за червень 2021 року за даними Центральної геофізичної обсерваторії ім. Б. Срезневського вона становила +21,3°С, що на 1,8°С вище за кліматичну норму. З 23 по 26 червня було побито аж 10 температурних рекордів. Зазначено 6 днів з максимальною температурою повітря вище +30,0°С. З даними спостережень на стаціонарних постах у період з 29 червня по 05 липня 2021 р. у повітрі м. Київ зафіксовано перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК с. д.) за середньодобовим вмістом в районі Дарницької площі: завислих речовин – у 1,0-1,2; діоксиду азоту – у 8,5 ; формальдегіду – у 3,1-3,6 рази.

Таким чином, на сьогоднішній день актуальним постає науково-практичне завдання щодо оцінки виробничого ризику для безпеки працюючих на відкритому повітрі в умовах поступового підвищення температурних показників в літні місяці року на фоні взаємозв'язку з іншими впливовими факторами для здоров'я ( забруднення атмосферного повітря, шумове забруднення).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Багато досліджень на даний час присвячено питанням взаємозв'язку між підвищенням температурних умов та вторинного забруднення атмосферного повітря міського середовища внаслідок фотохімічних перетворень [4-6]. Крім того на сьогоднішній день

не розглядалося питання впливу підвищення індексу забруднення повітря зваженими аерозольними частками  $PM_{2,5}$  внаслідок підвищення температурних умов та вологості повітря в літні спекотні місяці року на значення виробничого ризику для працівників будівельної та автодорожніх галузей економіки. На сьогоднішній день доведено, що тверді частки діаметром менш як 2,5 мкм в атмосфері міста є значним предиктором кількості підтверджених випадків COVID-19. Як відмічається в роботах закордонних авторів, очікувана кількість випадків COVID-19 зростає на 100% при збільшенні індексу забруднення атмосфери на 20% [7,8].

В п.4.1. документу ЄС «Посібник ЄС з оцінки ризиків на робочому місці» зазначено два основних принципи, щодо проведення оцінки ризиків: оцінку ризику слід планувати так, щоб забезпечити охоплення всіх важливих небезпек і ризиків; оцінку слід розпочати з суто теоретичних принципів, поставивши запитання, що є причиною наявності небезпеки [9].

Виходячи з першого принципу, при синергетичній дії забрудненого повітря від виробничих умов на будівельному майданчику та підвищеного рівня забруднення атмосферного повітря на території міста, де перебування працюючих є повний робочий день, виникає потреба в додаткових дослідженнях щодо визначення значень виробничого ризику.

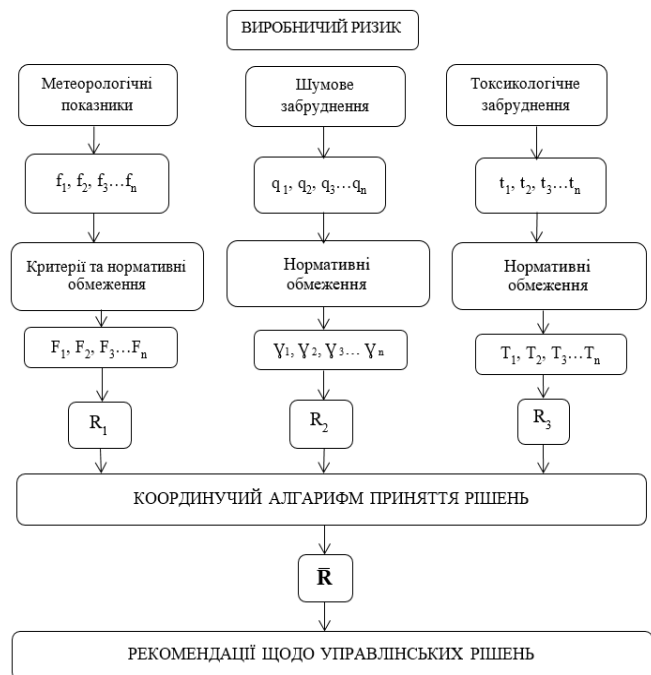
**Мета досліджень** полягає у визначенні виробничого ризику від хронічного інгаляційного впливу для безпеки працюючих при підвищених температурних показниках атмосферного повітря урбанізованої території.

### Викладення основного матеріалу досліджень

Для визначення виробничого ризику на відкритому майданчику необхідний комплексний синергетичний підхід з максимальним врахуванням всіх впливових факторів, які складають небезпеку для здоров'я даної категорії працюючих. При такому підході повинні бути враховані у кінцевому результаті на безпеку працюючих шумовий вплив токсикологічний на фоні підвищених температурних показників, а також взаємовплив температурних та якісних показників атмосферного повітря на здоров'я працівників.

Алгоритм цього врахування, за думкою авторів повинен базуватися на підході, представленим на рис. 1.

Формування виробничого ризику на працюючих відкритого повітря з урахуванням багаторічних трендів підвищення температури в умовах глобальних кліматичних змін проаналізовано за окремими показниками згідно даних моніторингових джерел спостережень на прикладі м. Києва. Авторами побудовані залежності між основними компонентами забруднення та середньомісячними температурними умовами розрізі 2013-2021 років спостережень. Дані залежності показали суттєвий вплив температурних показників на показники забруднення атмосферного повітря, як первинними, так і вторинними показниками внаслідок фотохімічних перетворень в повітрі.



**Рис. 1.** Алгоритм системної ієрархічної моделі оцінки і класифікації виробничого ризику для безпеки працюючих на відкритому повітрі

Встановлено, що дані залежності можуть бути апроксимовані за допомогою поліноміальних функцій с коефіцієнтом кореляції в межах 0,65 – 0,87.

Аналіз даних неканцерогенного ризику від забруднення основними компонентами, що перевищують референтні дози та температурними показниками на прикладі Дарницької площі м. Києва в розрізі 2013-2021 років показав, що його середнє значення дорівнює 13,3. Слід відзначити, що на авторозв'язці Дарницької площі м. Києва в 2019-2020 роках проводився капітальний ремонт проїжджої частини. Ризики для здоров'я населення визначалися керуючись діючими в Україні Методичними рекомендаціями МР 2.2.12-142- 2007. Інгаляційний хронічний неканцерогенний ризик розраховується за сумарним критерієм індексу безпеки (НІ). За прийнятою класифікацією рівнів, отриманий ризик в районі Дарницької площі в м. Києві був визначений як «значний».

На значення виробничого ризику для працюючих відкритих майданчиків у випадку пилового забруднення, суттєвий вплив здійснює крім температурних й показників також вологість повітря (рис. 2).

На рис. 2 представлені залежності між волого-вмістом в повітрі, температурними показниками та індексом забруднення AQIPM<sub>2,5</sub> в м. Києві за березень 2020 року.

При врахуванні пилового забруднення для безпеки працівників автодорожньої та будівельної галузей для визначенні значення виробничого ризику, необхідно враховувати також фонове забруднення аерозольними частками даного району міста, яке залежить від метеорологічних умов і кінетики фізико-хімічного перетворення.

Для встановлення залежності між кількісними показниками забруднення атмосферного повітря та показниками виробничого ризику та було розроблено шкалу класифікацій, яка ґрунтується на Гігієніч-

них регламентах гранично допустимих концентрацій хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць (Наказ МОЗУ від 14.01.2020, №52) та представлена в табл. 1.

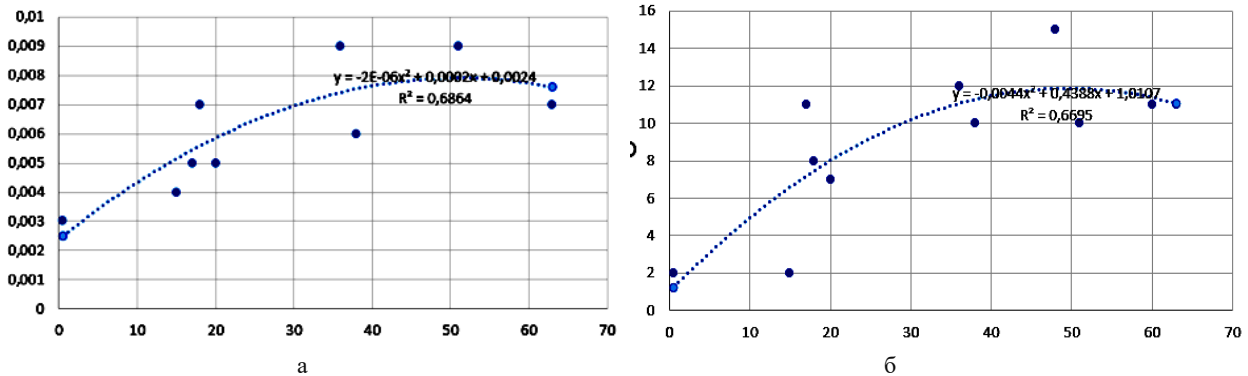


Рис. 2. Залежність між показниками вологовмісту в повітрі (а) і температурними показниками (б) та індексом забруднення аерозольними частками AQIPM2,5 в м. Києві за березень 2020 року

Таблиця 1 – Кількісні показники виробничого ризику та показників забруднення атмосферного повітря

№ з/п	Ступінь небезпечності (по значенню виробничого ризику)	Кратність перевищення референтних значень основних забруднювачів (береться по найбільшому значенню)	Значення виробничого ризику
1	2	3	4
1	<b>Безпечний</b> рівень ризику. При цьому рівні бажана (цільова) величина ризику при проведенні оздоровчих і природоохоронних заходів	<1	<1
2	<b>Помірно небезпечний</b> рівень ризику – припустимий для виробничих умов. За впливу на все населення, необхідний динамічний контроль і поглиблене вивчення джерел і можливих наслідків шкідливих впливів для вирішення питання про заходи управління ризиком	>1-2,0	1,0 – 10,0
3	<b>Небезпечний ризик</b> – неприпустимий для населення, для виробничих умов необхідний динамічний контроль і поглиблене вивчення джерел і можливих наслідків шкідливих впливів для вирішення питання про заходи управління ризиком.	>2,0-9	50,0 – 100,0
4	<b>Дуже небезпечний</b> рівень ризику – ризик неприйнятний для виробничих умов і населення. Необхідне здійснення заходів з усунення або зниження ризику	>9	>100,0

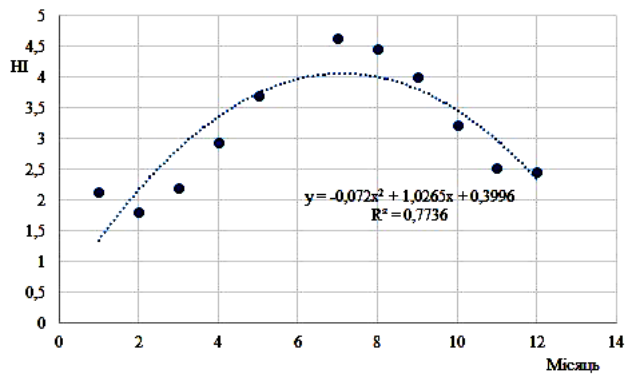
Ступінь небезпечності виробничого ризику по перевищенню концентрації одного найбільш небезпечного забруднювача також визначається за даним підходом за окремим показником.

В якості прикладу приведемо значення рівня виробничого ризику від формальдегідного забруднення біля чотирьох автомобільних розв'язок: вул. Богатирська - вул. Лугова - проспект Маршала Тимошенка, вул. Щербаківського - вул. Стеценка- вул. М.Гречка ,ул. Щусева - вул. Олени Теліги- вул. Мельникова та вул. Олени Теліги - проспект С. Бандери - Куренівка м.Києва. Дані аналізу представлені на рис. 3. Для аналізу було взято моніторингові дані 2016 року, для одного з самих найспекотніших років останніх десяти років.

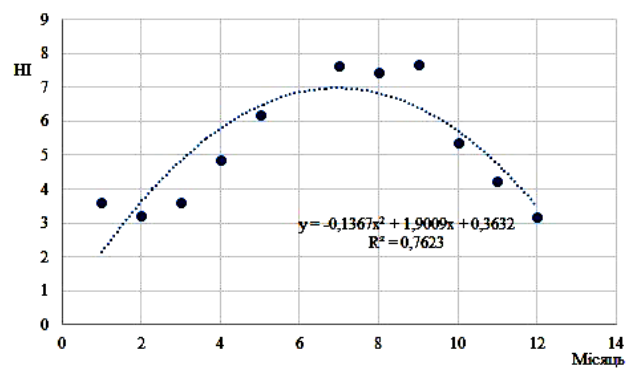
На рис. 4 приведено залежності між даними середньомісячного індексу забруднення аерозольними частками PM2,5 атмосферного повітря та даними виробничого неканцерогенного ризику для 2020 року на окремих автомобільних шляхопроводах в м. Києві.

Представлені залежності частково згладжують вплив метеофакторів на епізодичний спалах забруднення повітря (швидкість повітря, вологість, температура), дані аналізу моніторингових даних за останні роки підтверджують відому гіпотезу про суттєвий вплив на рівень аерозольного забруднення міста природних надзвичайних ситуацій(пожежі, пилові бурі, спалювання сільськогосподарських відходів тощо).

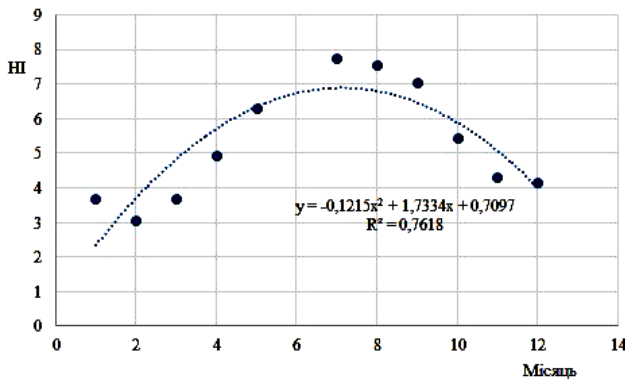




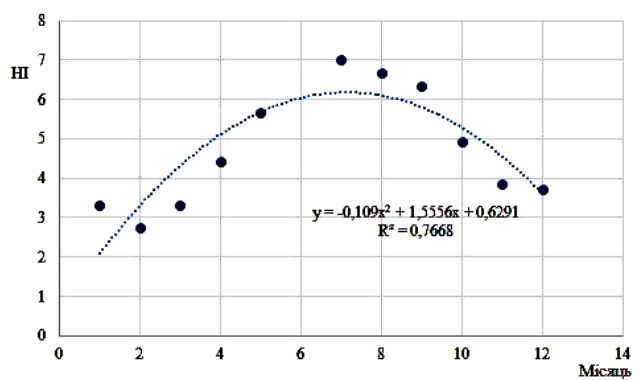
а) вул. Богатирська - вул. Лугова - проспект Маршала Тимошенка



б) вул. Щербаковського - вул. Стеценка - вул. М.Гречка

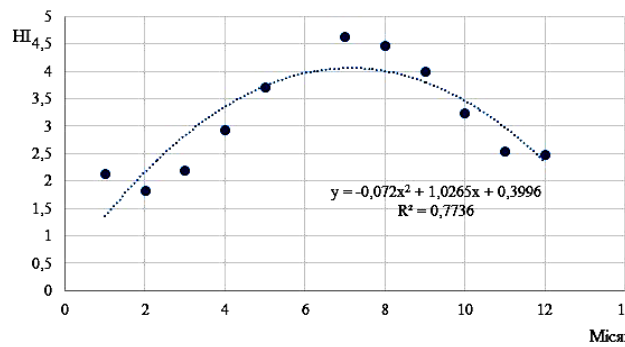


с) ул. Щусева - вул. Олени Теліги - вул. Мельникова

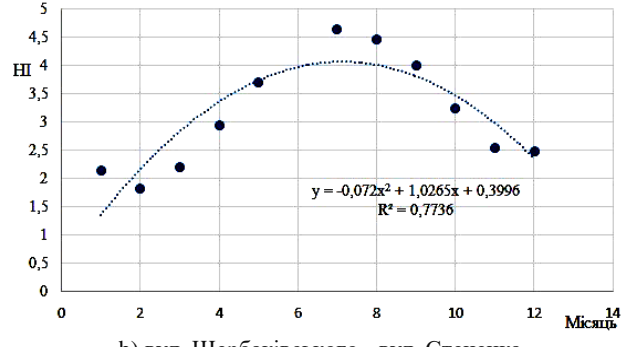


д) вул. Олени Теліги - проспект С. Бандери - Куренівка

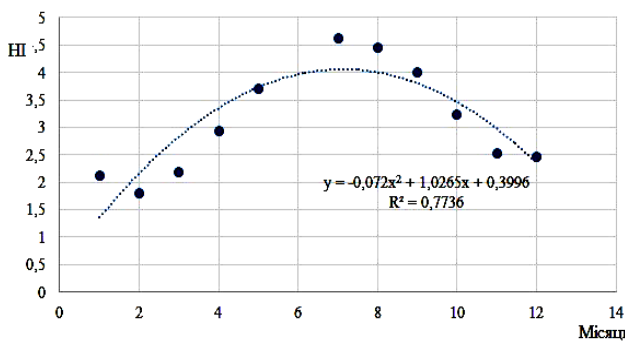
Рис. 4. Середньомісячні значення неканцерогенного ризику від забруднення формальдегідом атмосферного повітря внаслідок фотохімічних перетворень біля окремих автомобільних розв'язок м. Києва в 2016 році



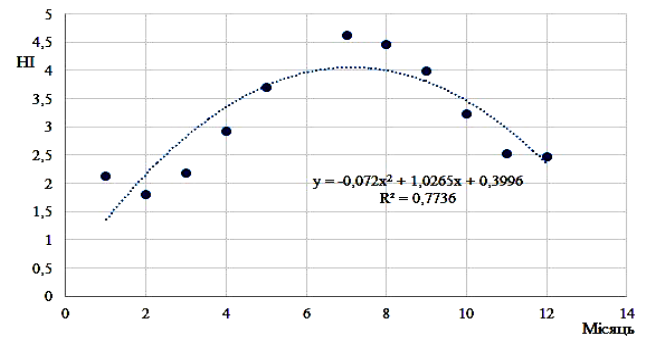
а) вул. Богатирська - вул. Лугова - проспект Маршала Тимошенка



б) вул. Щербаківського - вул. Стеценка - вул. М.Гречка



с) ул. Щусева - вул. Олени Теліги - вул. Мельникова



д) вул. Олени Теліги - проспект С. Бандери - Куренівка

Рис. 5. Значення індексу забруднення атмосферного повітря аерозольними частками PM<sub>2,5</sub>мкм для окремих автошляхопроводів в м. Києві для окремих місяців 2020 року

## Висновки

1. Отримані залежності ще раз підкреслили взаємозалежність температурних умов, ступінь забруднення атмосферного повітря та, відповідно, значення виробничого ризику для безпеки працюючих відкритого повітря біля автомобільних розв'язок. Також слід відмітити про необхідність динамічного контролю протягом року за величиною виробничого ризику та управління цим ризиком.

2. Проведений розрахунок величин неканцерогенних ризиків від забруднення атмосферного повітря за умов підвищених температурних умов на прикладі Дарницької площі та окремих транспортних розв'язок м. Києва показав, що для працюючих, в умовах відкритого повітря існує потреба у динамічному контролі і поглибленому вивченню джерел і можливих наслідків шкідливих впливів. За таких умов існує потреба подальшого удосконалення системи моніторингу атмосферного

повітря в районі автотранспортних шляхопроводів та великих перехрестів м. Києва органами Державної гідрометеорологічної служби України та Державної санітарно-епідеміологічної служби МОЗ України.

3. Досягнення прийнятного рівня ризику для працюючих даної категорії в зонах максимального його значення може бути досягнуто шляхом впровадження відповідних заходів, які крім посилення повинні включати також і організацію руху транспорту, максимальне впровадження екологічно-чистих видів транспорту та використання екологічно більш чистого палива.

4. Результати роботи стануть в нагоді при розробці рекомендацій щодо безпеки працюючих в умовах поступового підвищення температурних показників внаслідок глобальних кліматичних змін, а також при розробці містобудівельних норм охорони праці на будівельних майданчиках.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мікроклімат та його вплив на працездатність людини. *Головне управління держпродспоживслужби в Хмельницькій області* : веб-сайт. URL: <https://consumerhm.gov.ua/956-mikroklimat-ta-jogo-vpliv-na-pratsezdattnist-lyudinita-jogo-vpliv-na-pratsezdattnist-lyudini>.
2. В.В.Березуцький, М.І. Адаменко Небезпечні виробничі ризики та надійність: навчальний посібника для студентів за напрямком підготовки 6.170202 «Цивільна безпека»/– Харків. ФОП Панов А. М., 2016 – 385 с.
3. Асфальт у київі розігрівся до нечуваної температури: фотофакт. *24 Київ* : веб-сайт. URL: [https://24tv.ua/kyivnews/asfalt\\_u\\_kyievi\\_rozigrivysya\\_do\\_nechuvanoyi\\_temperaturi\\_fotofakt\\_n704968](https://24tv.ua/kyivnews/asfalt_u_kyievi_rozigrivysya_do_nechuvanoyi_temperaturi_fotofakt_n704968)
4. Sipakov R., Trofimovich V. *et al.* Impact of Weather Factors on the Speed of the Reaction of Formaldehyde Formation Above Motorway Overpasses/ *Environmental Problems*, Volume 3, number 2, Lviv Politechnic National University, P. 97-102, 2018.
5. Sipakov, R., Voloshkina, O., *et al.* Pollution of atmospheric air above the city highways. //USEFUL online journal, vol. 2, no. 4, pp. 01–08, December 2018. DOI: <https://doi.org/10.32557/useful-2-4-2018-0001>.
6. Pollution of atmospheric air above the city highways / R.Sipakov, O.Voloshkina, D.Varavin, Y.Ampilova, T.Krivomaz, J.Bereznitska // USEFUL, vol. 2, no. 4, pp. 01–08, Dec. 2018. DOI: <https://doi.org/10.32557/useful-2-4-2018-0001>
7. Liao, T., Jiang, W., Ouyang, Z. *et al.* Evaluation of the health risk of air pollution in major Chinese cities using a risk-based, multi-pollutant air quality health index during 2014–2018. *Air Qual Atmos Health* (2021). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01042-6>
8. Edoardo Conticini, Bruno Frediani, Dario Caro (2020). Can atmospheric pollution be considered a co-factor in extremely high level of SARS-CoV-2 lethality in Northern Italy *Environmental Pollution*, Volume 261, June 2020, 114465 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114465>
9. Посібник з оцінки ризиків на робочому місці. *Європейська комісія генеральний директорат з питань зайнятості і соціальної політики* : веб-сайт. URL: [https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed\\_dialogue/---lab\\_admin/documents/projectdocumentation/wcms\\_650135.pdf](https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---lab_admin/documents/projectdocumentation/wcms_650135.pdf)

Received (Надійшла) 30.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

## Production risk for safety of outdoor workers from the temperature conditions of the environment

E. Voloshkina, A. Kovalova

**Abstract.** The researches on the analysis of influence of temperature indicators of atmospheric air of the urbanized territories on indicators of pollution of the primary and secondary elements influencing a condition of air, on value of industrial risk are presented. An algorithm of a system hierarchical model of assessment and classification of industrial risk for workers working outdoors is proposed. The dependences between air moisture content, temperature indicators and AQIPM2.5 pollution index in Kyiv for March 2020 are presented. The interaction of temperature and air quality on the health of workers at open production sites in 2016 is presented on the example of individual road overpasses in Kyiv, as one of the hottest years of the last decade. The average monthly values of the index of air pollution by aerosol particles PM2.5 microns and production risks depending on the secondary formaldehyde pollution in the case of photochemical transformations are presented. A scale of classifications between quantitative indicators of production risk and indicators of air pollution has been developed. The degree of danger of production risk will be determined by a separate negative indicator. It is determined by the excess of concentrations of this pollution over the reference value. The results of the work begun in the development of recommendations for the protection of work efficiency in the context of a gradual increase in temperature, as well as in the development of urban building codes for labor protection on construction sites.

**Keywords:** production risk, air pollution, temperature, global climate change, scale of risk classification, risk model algorithm.

В. А. Глива<sup>1</sup>, І. В. Матвєєва<sup>2</sup>, Л. А. Зозуля<sup>2</sup>, С. В. Зозуля<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

<sup>2</sup> Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАЛІЗОВМІСНОГО КОМПОЗИТУ ДЛЯ ЕКРАНУВАННЯ РЕНТГЕНІВСЬКИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

**Анотація.** У роботі експериментально досліджено ефективність екранування рентгенівських випромінювань композиційними металовмісними матеріалами з наповнювачем із заліза. Показано, що для «м'якого» випромінювання коефіцієнти екранування складають 7 – 8. Перемішування рідкої металополімерної суміші ультразвуковим випромінюванням частотою 23 кГц з амплітудами 40 – 45 мкм значно підвищує ефективність екранування (у 2 – 2,5 рази). Розраховані масові коефіцієнти ослаблення рентгенівського випромінювання свідчать, що для енергій випромінювання 8 – 12 кеВ залізвмісний матеріал має кращі захисні властивості, ніж матеріал із вмістом свинцю. Дано розрахунок для врахування фактичної густини матеріалу для визначення масового коефіцієнта ослаблення. При цьому зарядовий номер елемента, який забезпечує розсіювання рентгенівського випромінювання залишається незмінним. Показано, що цей показник слід перераховувати для визначення внеску інших, ніж фотоэффект, механізмів розсіювання іонізуючого випромінювання (утворення електрон-позитронних пар, ефект Комптона). Для підвищення ефективності композиційних рентгенозахисних матеріалів доцільно підвищити дисперсність та ваговий вміст залізного концентрату у полімерній матриці. За співвідношення заліза та полімеру 3:1 (за вагою) матеріал втрачає гнучкість і може застосовуватись у вигляді облицювальних плиток. Для підвищення коефіцієнтів екранування «жорсткого» випромінювання у матеріал доцільно додавати сполуки вольфраму у невеликій кількості. Перспективним напрямом досліджень щодо застосування безсвинцевих матеріалів є підвищення дисперсності наповнювачів з елементів з меншими зарядовими числами.

**Ключові слова:** іонізуюче випромінювання, композиційний матеріал, екранування, ультразвук.

### Вступ

Захист населення та працюючих від впливу іонізуючого випромінювання залишається в Україні актуальною проблемою. Значною мірою це стосується рентгенівського випромінювання різної жорсткості через застосування цих випромінювань як робочих у промисловості та охороні здоров'я. Так, на сьогоднішній день усі стоматологічні кабінети повинні бути обладнані рентгенівськими апаратами. Такі кабінети розташовуються, здебільшого, у житлових будинках, тому застосування захисних конструкцій із вмістом свинцю та його сполук заборонено. Пошук шляхів створення матеріалів на заміну матеріалів із вмістом свинцю є загальносвітовою тенденцією як через його токсичність, так і відносно високу вартість та складність монтажу захисних конструкцій. Одним із можливих заміників є композиційний матеріал на основі полімеру й заліза та його сполук, що потребує проведення ретельних експериментальних та теоретичних досліджень.

**Аналіз останніх публікацій і досліджень.** Більшість досліджень у цій галузі стосуються матеріалів для захисту від гама-випромінювань, які заздалегідь ефективно екранують рентгенівські випромінювання [1, 2]. У цих роботах розглядаються матеріали, у яких захисними елементами є диспрозій та гадоліній, а також сполуки елементів з малим зарядовим числом – бора та лужних металів. Очевидно, що такі наповнювачі, навіть за високих ефективностей, роблять захисні матеріали дуже дорогими і непридатними для масового застосування. Навіть для рентгенозахисних матеріалів застосовують композиції на полімерній основі з вмістом вісмуту та вольфраму [3]. Те ж саме стосується матеріалу з вуглецевими наповнювачами [4]. За-

звичай захист від випромінювань рентгенівської частини спектра частот (енергій) простіший, тому створення матеріалів великої вартості економічно не виправдане. Взагалі відмінності матеріалів, що досліджуються стосуються, в основному, матеріалів матриць композицій. У роботі [5] це етилен-вініл-ацетат з наповнювачем з вольфраму, у [6] – поліетилен з сполуками барію, триоксидувісмути та оксиду вольфраму. Застосовується також епоксидна смола через відсутність деградації під впливом іонізуючих випромінювань [7]. У роботі [8] досліджено принципові можливості й визначені енергії, для яких композиційний залізвмісний матеріал буде достатньо ефективним. Зазвичай діагностичне обладнання не генерує рентгенівських випромінювань високих енергій, до того ж найбільшу небезпеку становлять побічні (паразитні) випромінювання малої інтенсивності, для яких великі коефіцієнти екранування не потрібні.

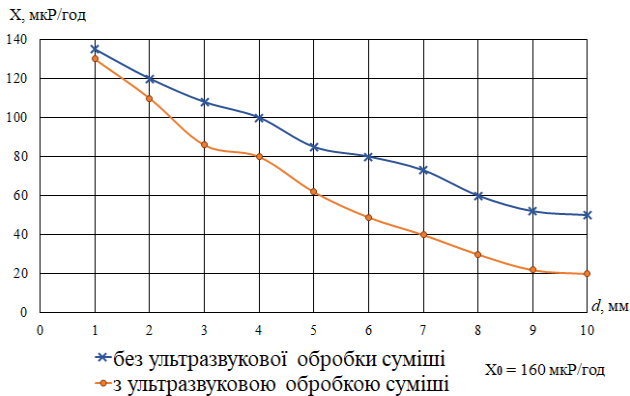
**Мета роботи** – дослідити коефіцієнти екранування рентгенівських випромінювань металополімерними композиціями на основі заліза та його сполук.

### Виклад основного матеріалу

Для виготовлення зразків використовувався рідкий латекс та залізорудний концентрат (вміст заліза 60 – 68 %, середній розмір залізорудних частинок 22 – 23 мкм). Концентрат виготовлено на Полтавському ГЗК. Сухий залізорудний концентрат додавався до латексу у кількості 60 % (за вагою). Суміш спочатку перемішувалася механічно упродовж 15 хв., а потім упродовж 10 хв. Оброблялася ультразвуком частотою 23 кГц амплітудою 40 – 45 мкм. Отримана суміш наливалася на пласкі поверхні шарами різної товщини. Після полімеризації зразки були готові до використання. Розміри зразків 0,2 × 0,2 м. Визначення

ефективності захисту здійснювалося методом прямих вимірювань СРП-68-01. Вимірювався рівень рентгенівського випромінювання джерела перед і після захисного екрана. Джерелом рентгенівського випромінювання слугував медичний рентгенівський апарат Neo-Diagnostax з робочими напругами на рентгенівській трубці 40 – 125 кV.

У процесі досліджень визначалися захисні властивості металополімерних композицій без застосування ультразвукової обробки рідкої вихідної суміші і обробленої ультразвуком (рис. 1).



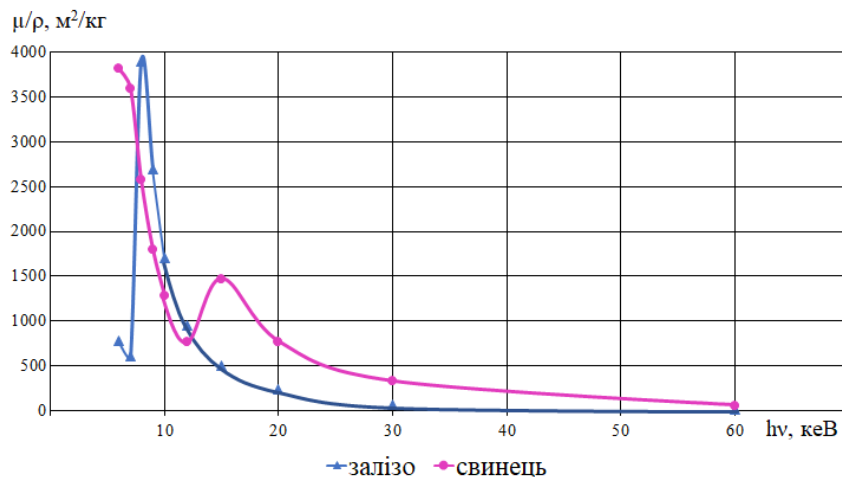
**Рис. 1.** Зниження інтенсивності рентгенівського випромінювання металополімером на основі залізовмісного порошку

Як видно з графіків, ультразвукове перемішування металополімерної суміші значно підвищує

захисні властивості матеріалу. Очевидно, це пов'язано з підвищенням дисперсності наповнювача, рівномірністю й щільністю розташування металевих частинок у тілі матриці, що підвищує імовірність взаємодії рентгенівського кванта з речовиною. Але коефіцієнти екранування матеріалів відносно невеликі – 7-8, хоча для більшості умов експлуатації рентгенівського обладнання цілком достатні. Такі ефективності можна пояснити тим, що під час проведення експериментів застосовувалося рентгенівське випромінювання енергією близько 50 кеВ, що згідно [8] відповідає найнижчій ефективності заліза порівняно зі свинцем. Доцільно розрахувати розподіл ефективності залізовмісних композицій, яка залежить від масового коефіцієнта ослаблення  $\mu_M = \mu/\rho$ , де  $\mu$  – лінійний коефіцієнт ослаблення матеріалу;  $\rho$  – густина матеріалу. Коефіцієнт ослаблення залежить від енергій рентгенівського випромінювання (рис. 2).

Аналіз результатів свідчить, що для енергій 8 – 12 кеВ залізовмісний матеріал має кращі функціональні показники, ніж матеріал на основі свинцю.

Для більшості медико-діагностичних застосувань відмінності енергій, наведених на рис. 2 несуттєві. У загальному випадку енергія рентгенівського випромінювання залежить від прискорюючої напруги у лампі та матеріалу, з якого виготовлений анод трубки. За певних умов можна вирішити питання достатності захисних властивостей залізовмісного композиту, що значно спростить формальні процедури застосування рентгенівської техніки.



**Рис. 2.** Залежність захисних властивостей матеріалів від енергії рентгенівського випромінювання

Для малих енергій випромінювань превалюючим механізмом розсіювання рентгенівських квантів є фотоэффект. Масовий коефіцієнт ослаблення  $\tau/\rho$  однозначно визначається як:

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{Z^4}{(h\nu)^2}, \quad (1)$$

де  $Z$  – порядковий номер елемента, який забезпечує захист;  $\rho$  – його густина;  $h$  – стала Планка ( $6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с);  $\nu$  – частота рентгенівського кванта.

У цьому співвідношенні  $Z$  порядковий номер металу у періодичній таблиці, саме він забезпечує захист, але  $\rho$  матеріалу відрізняється від густини металу. Наприклад, у даному випадку (рис.1) кількість залізовмісної субстанції 60 %, тобто  $m_M = 1,5m_P$  (маса металу у 1,5 рази більша маси полімеру). Це треба враховувати для оціночного розрахунку захисних властивостей композицій.

Якщо  $m_M = km_P$ , а  $\rho = m/v$ , то  $\rho$  суміші визначається як:

$$\rho = \frac{\rho_m \rho_p (k+1)}{k\rho_p + \rho_m}, \quad (2)$$

де  $\rho_m$  та  $\rho_p$  – густина металу й полімеру, застосованих для виготовлення композитного рентгенозахисного матеріалу.

Цей підхід слушний не тільки для використання співвідношення (1), а й для визначення внеску інших механізмів розсіювання іонізуючих випромінювань (утворення електрон-позитронних пар, ефект Комптона).

Як зазначалося, ефективність дослідженого матеріалу не зовсім прийнятна для «жорсткого» рентгеновського випромінювання та гамма-випромінювань, поширених у медичній та технічних галузях.

Щодо використання залізорудного концентрату, то можливі кілька шляхів підвищення якості композитів на його основі.

Найпростіший – збільшення вагового внеску заліза у полімер. Попередні експерименти свідчать, що вагове співвідношення наповнювач-полімер може бути й 3:1. При цьому полімер є звичайним в'язучим і виріб втрачає гнучкість, але у більшості випадків

облицювання приміщень, що потребують захисту, здійснюється облицювальними плитками. Доцільно розглянути можливість додавання у вихідну суміш екрануючих елементів типу сполук вольфраму, але у менших кількостях порівняно з іншими виробами. Це дозволить не збільшувати товщину залізополімерних матеріалів, що у багатьох випадках є критичним.

### Висновки

1. Дослідження довели, що застосування композиційного матеріалу із вмістом заліза у кількості 60 % (за вагою) і більше ефективне для захисту від рентгеновських випромінювань з енергіями 8 – 12 кеВ.

2. Коефіцієнт екранування залізополімерного матеріалу для фіксованої енергії випромінювання практично лінійно підвищується зі збільшенням товщини екрана.

3. Для попередніх оцінок ефективності композиційних матеріалів у співвідношеннях з їх розрахунків слід враховувати фактичну густину композиції за використання зарядового числа металевого наповнювача.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Singh, V.P., Badiger, N. M. Kothan, S., Kaewjaeng, S., Korkut, T., Kim, H. J., Kaewkhao, J., 2015. Gamma- ray and neutron shielding efficiency of Pb-free gadolinium based glasses. *Journal of Nuclear Science and Techniques*, 27(4), 103.
2. Mann, K. S., Rani, A., Heer, M. S., 2015. Shielding behaviors of some polymer and plastic materials for gamma-rays. *Radiation Physics and Chemistry*, 106 , 247–254.
3. Рентгенозащитная композиция: пат. 2294030 Россия: МПК G21F 1/10 / Г.Г. Савкин, Р.В. Кушникова, Е.С. Назарова, Г.Ф. Пряникова и др. № 2002126334/06; заявл. 02.10.2002; опубл. 20.02.2007, Бюл. № 5.– 6 с.
4. Углеродсодержащая композиция: пат. 2519244 Россия: МПК H01G 17/00, G21F 1/00 / В.В. Поливкин, В.Н. Гульбин, В.А. Михеев, Н.С. Колпаков. № 2012145071/07; заявл. 24.10.2012; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.– 6 с.
5. Ersoz, O. A., Lambrecht, F. Y., Soyly, H. M., 2016. Tungsten-ethylene vinyl acetate (EVA) composite as a gamma rays shielding material. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 54 (12), 793-796.
6. Seon-Chil Kim and Sung-Hyoun Cho., 2019. Analysis of the Correlation between Shielding Material Blending Characteristics and Porosity for Radiation Shielding Films. *Journals Applied Sciences* 9(9), 1765; <https://doi.org/10.3390/app9091765>.
7. Джур Е.А., Санин А.Ф., Божко С.А., Андрианов А.Ю., Белоус В.А., Рыбка А.В., Захарченко А.А., Борисенко В.Н., Зиновьев А.М., Кузнецов А.П., Плиса Ю.В., 2013. Композиционный материал для защиты радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов от ионизирующего излучения. *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. № 6 (52). С. 126–131.
8. Глива В.А. Проектування композитних матеріалів на основі дрібнодисперсної залізовмісної субстанції для екранування іонізуючих випромінювань / В.А. Глива, І.В. Матвєєва, Л.О. Левченко, Н.М. Кічата // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2020. – № 2 (60). С. 110–113.

Received (Надійшла) 15.07.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

### The investigation of protective properties of iron-containing composite for X-ray shielding

V. Glyva, I. Matvieieva, L. Zozulia, S. Zozulia

**Abstract.** The paper presents experimental investigation of the efficiency of X-ray shielding by composite metal-containing materials with iron filler. It demonstrates that for “soft” radiation the shielding coefficients are 7-8. Mixing the liquid metal-polymer mixture with ultrasonic radiation with a frequency of 23 kHz with amplitudes of 40 - 45  $\mu\text{m}$  significantly increases the shielding efficiency (by 2-2.5 times). The calculated mass attenuation coefficients of X-ray radiation show that for radiation energies of 8-12 keV the iron-containing material has better protective properties than the material with lead content. It offers the calculation, which takes into account the actual density of the material to determine the mass attenuation coefficient. In this case, the charge number of the element that provides scattering of X-rays remains unchanged. It is shown that this indicator should be recalculated to determine the contribution of mechanisms other than the photoeffect of ionizing radiation scattering (formation of electron-positron pairs, Compton effect). To increase the efficiency of composite X-ray protective materials, it is advisable to increase the dispersion and weight content of iron concentrate in the polymer matrix. At a ratio of iron and polymer 3: 1 (by weight) the material loses flexibility and can be used in the form of facing tiles. To increase the shielding coefficients of “hard” radiation, it is advisable to add a small amount of tungsten compounds to the material. A promising area of research on the use of lead-free materials is the increased dispersion of fillers from elements with lower charge numbers.

**Keywords:** ionizing radiation, composite material, shielding, ultrasound.

О. В. Панова

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

## ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ У КОМПЛЕКСІ ЗАХОДІВ З НОРМАЛІЗАЦІЇ РІВНІВ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ СЕРЕДОВИЩА

**Анотація** Найбільш ефективним засобом зниження рівнів електричних, магнітних та електромагнітних полів широкого частотного діапазону у виробничих та побутових умовах є їх екранування. Але у реальних умовах потребують корекції і інші фізичні фактори. Показано, що найбільш критичними з них є акустичний шум та аероіонний склад повітря. Це обумовлює необхідність здійснювати нормалізацію фізичних факторів на комплексній основі. Застосування у якості матриці для електромагнітного екрана пінолатексу і наповнювача з залізорудного концентрату дозволяє знизити рівні електромагнітних полів і акустичного шуму до нормативних значень. Навіть, для частотних смуг 31,5 Гц та 63 Гц за товщини екрана 10 мм індекси зниження шуму складають 15-20 дБ. Для частот 6-8 кГц цей показник складає 40-45 дБ, що прийнято для більшості виробничих умов. При цьому коефіцієнти екранування магнітних полів промислової частоти та електромагнітних полів ультрависоких частот відповідають нормативним вимогам. Показано, що головним фактором деіонізації повітря є електростатичні заряди, які накопичуються на полімерних повітрях, яке до того ж є причиною спрямованого руху дрібнодисперсного пилу. Перевагою латексу є відсутність електризації поверхні, що дозволяє застосувати його для облицювання поверхонь великих площ. При цьому він має пружні модулі, близькі за значеннями до модулів матеріалів, які традиційно застосовуються для шумопоглинання. Найефективнішим методом нормалізації та підтримання на нормативному рівні концентрацій аероіонів обох полярностей є застосування пристроїв штучної іонізації повітря. Для рівномірного розподілу аероіонів у об'ємі приміщень застосовують розсіюючі екрани. Перевагою екранів з латексу є відсутність часткового поглинання іонів під час розсіювань. Запропонований підхід з нормалізації рівнів електромагнітних полів акустичного шуму та концентрацій аероіонів, разом із застосуванням систем клімат-контролю дозволяє підтримувати на нормативному рівні увесь комплекс фізичних факторів виробничого середовища. Це найбільш актуально для приміщень об'єктів критичної інфраструктури (головних щитів керування, диспетчерських тощо).

**Ключові слова:** фізичні фактори, електромагнітне поле, акустичний шум, екранування, аероіони.

### Вступ

Фізичні фактори техногенного походження негативно впливають на стан здоров'я працюючих. У сучасних умовах існує тенденція підвищення такого впливу через насиченість побутового середовища джерелами електромагнітних полів, акустичного шуму, деіонізацію повітря тощо, що обумовлює зниження реабілітаційного періоду (відпочинку) від виробничих впливів. В сучасних умовах постійного вдосконалення техніки та організації виробництва змінюються нормативні державні та міжнародні вимоги. Така реорганізація потребує як поліпшення національних санітарних норм, так і проведення параметрів виробничого та побутового середовищ у відповідність принаймні нормативним вимогам.

На сьогоднішній день добре розроблено системи керування мікрокліматичними параметрами приміщень, які входять до переліку фізичних факторів – температура, відносна вологість та швидкість спрямованого руху повітря. В той же час системи аероіонізації повітря опрацьовані недостатньо з точки зору взаємозв'язку з іншими факторами.

Це ж стосується комплексу заходів з електромагнітної безпеки. Ситуативний підхід до нормалізації фізичних факторів не завжди виправданий через їх складну динаміку у просторі і часі

через внутрішні та зовнішні впливи. Найбільш дієвий спосіб зниження рівнів техногенних електромагнітних полів – екранування, може негативно вплинути на функціонування засобів зв'язку та потужність геомагнітного поля. У деяких випадках порушується аероіонний режим приміщень. Це потребує дослідження та розроблення комплексного підходу до нормалізації рівнів найбільш критичних фізичних факторів у виробничих та побутових умовах.

### Огляд останніх публікацій і досліджень

У сучасних умовах найбільша увага приділяється дослідженням з мінімізації кількісних значень електромагнітних та акустичних полів.

Зокрема, розробляються фізичні засоби захисту – матеріали і конструкції для екранування електричних, магнітних, електромагнітних полів та поглиначів шуму [1–4].

Найбільш ефективними матеріалами для екранування електромагнітних полів є композити різного складу. Їх перевагами є менші, порівняно з металами, коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль [5].

Більшість досліджень зі зниження акустичного навантаження у приміщеннях стосуються розроблення відповідних будівельних та оздоблювальних матеріалів [6, 7].

Але матеріали для одночасного зниження рівнів електромагнітних та акустичних полів практично не розглядаються [8].

Масове застосування полімерних матеріалів, навіть у спеціалізованих приміщеннях (авіадиспетчерські) породжує проблему деіонізації повітря, що є вкрай шкідливим для здоров'я [9].

Але розробки та дослідження у цьому напрямі у більшості стосуються моделювання поширення аероіонів від джерела штучної іонізації [10].

На сьогоднішній день практично відсутня альтернатива застосування електромагнітних екранів у виробничих умовах з огляду на широкий частотний спектр та високі амплітуди електромагнітних полів. Тому актуальним є розглянути можливість застосування екранування у комплексі з заходами нормалізації інших фізичних факторів, які прямо або опосередковано пов'язані з рівнями електричних, магнітних та електромагнітних полів.

**Мета статті** – розроблення методологічних підходів із застосування матеріалів для екранування електромагнітних полів та їх складових одночасно і у комплексі з заходами нормалізації рівнів акустичного шуму та аероіонного режиму приміщень.

### Виклад основного матеріалу

Розглядати засоби зниження рівнів техногенних полів та підвищення якості повітря за аероіонним складом доцільно у послідовності їх пріоритетності у сучасних умовах та взаємозв'язку.

Екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону необхідно реалізувати з урахуванням наступних вимог:

- зниження рівнів електромагнітних полів дуже високих і ультрависоких частот не повинне суттєво впливати на робото-спроможність засобів бездротового зв'язку. Захист за рахунок відбиття потрібно мінімізувати;

- обов'язковими є зниження рівнів магнітної складової електромагнітного поля наднизької частоти, в основному промислової (екранування електричної складової не є проблемою);

- електромагнітні екрани не повинні знижувати напруженість природного геомагнітного поля більше, ніж удвічі (більше 25 мкТл).

При цьому бажано, щоб електромагнітний захист поступово впливав на акустичну обстановку та концентрацію аероіонів.

Такі цілі можливо реалізувати за рахунок застосування композиційних магнітодіелектричних матеріалів.

У якості матриці доцільно використати рідкий латекс, який можна отримати у готовому вигляді, що знижує вартість кінцевого продукту. Наповнювачем може бути концентрат залізної руди, переважною складовою якого є магнетит.

Виготовлення матеріалу здійснюється за принципом градієнтного екрана із збільшенням концентрації дрібнодисперсного наповнювача (10-20 мкм) від пове-

рхні падіння електромагнітних хвиль до внутрішньої поверхні. Це досягається обробленням шару рідкої суміші потрібної товщини неоднорідним постійним магнітним полем.

Досвід свідчить, що поля максимальною напруженістю 400–450 А/м достатньо для отримання значного градієнта концентрації. Головний чинник – неоднорідність магнітного поля. У цьому випадку на лицьовому боці матеріалу концентрація магнітних частинок незначна і в принципі регульована. Це потрібно для мінімізації відбиття електромагнітних хвиль у небажаний бік, наприклад у зону перебування людей, або перерозподіл інтенсивності випромінювання у будівлі.

Коефіцієнт відбиття визначається співвідношеннями імпедансів середовища розповсюдження електромагнітних хвиль та захисного матеріалу:

$$K_r = \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0},$$

де  $Z_0$  і  $Z_m$  - імпеданси повітря та матеріалу.

Враховуємо, що

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$$

та

$$Z_m = \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}$$

де  $\mu_0$ ,  $\varepsilon_0$  - магнітна та діелектрична сталі.

Абсолютні магнітна та діелектрична проникність матеріалу визначаються співвідношеннями:

$$\mu_a = \mu_0 \mu, \text{ та } \varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon,$$

де  $\mu$ ,  $\varepsilon$  - відносні магнітна та діелектрична проникність матеріалу (для мінімізації коефіцієнтів відбиття максимально наблизити співвідношення  $\frac{\mu}{\varepsilon}$  до одиниці).

Відносна магнітна проникність магнетиту  $\sim 14$ , тобто за його малих концентрацій у полімері магнітна проникність буде знижуватися. Діелектричні проникності латексів 30-40, що не є задовільним. Враховуючи головну задачу – захист від електромагнітних впливів (особливо магнітної складової низькочастотного електромагнітного поля), розраховується необхідна для потрібного коефіцієнта екранування концентрація екрануючого наповнювача (наприклад, за формулою Лорентца). Вона визначає магнітну проникність матеріалу за даним об'ємним вмістом магнітного наповнювача.

Для отримання потрібного імпедансу необхідно забезпечити відповідне значення діелектричної проникності.

Для латексів вона складає 30–40. Але, як показано у [11], цей показник можна знизити за рахунок отримання пінолатексу. Діелектрична проникність залежить від кратності латексної піни.

За зміни кратності від 3 до 9 діелектрична проникність зменшується з 10 до 4. Потрібну кратність піноутворення можна визначити з емпіричного співвідношення:

$$\varepsilon = 16,65 - K^2,$$

де  $K$  – кратність піноутворення.

Такий підхід, як показали попередні експерименти, дозволяє знизити коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль ультрависокої частоти до 0,15-0,20, що, скоріш за все, є технічно досяжною метою. Для більш точного визначення імпедансу матеріалу на конкретній частоті випромінювання доцільно скористатися співвідношенням:

$$Z_m = \sqrt{\frac{j2\pi f \mu}{\sigma + j2\pi f \varepsilon}},$$

де  $j$  – уявна одиниця,  $\sigma$  – питома провідність матеріалу,  $f$  – частота електромагнітної хвилі.

Потрібну товщину матеріалу визначають, виходячи з еквівалентної глибини проникнення поля (зниження до  $1/e$  від початкового значення):

$$\delta = \sqrt{\pi f \mu \sigma}.$$

Якщо для зниження техногенного низькочастотного магнітного поля потребує екранування вертикальна площина з орієнтацією за магнітним полем Землі, необхідно розрахувати екранування горизонтальної складової геомагнітного поля (~ 46 мкТл на широті Києва). Це можливо із застосуванням формул Релея або Оделевського для стаціонарних магнітних полів, які враховують різний вміст магнітних частинок у діелектричній матриці.

Використання пінолатексу надає можливість застосувати електромагнітний екран для одночасного зниження рівнів акустичного шуму.

Відомо, що ефективність шумопоглинання залежить від значень пружних модулів і наявності неоднорідностей у матеріалі.

Пружні модулі латексу близькі за значеннями до модулів полімерів, які традиційно використовуються для захисту від шуму. Для латексу значення модуля Юнга становить 11 ГПа, модуль Пуассона – 0,44; для матеріалу твінтекс модуль Юнга відповідає значенню 15,7 ГПа, а модуль Пуассона – 0,204 [8]. Додавання до полімеру піноутворювача дозволяє отримати ті ж індекси зниження шуму для матеріалів удвічі меншої товщини.

Попередні експерименти показали, що для октавних смуг частот 31,5 та 63 Гц індекси зниження шуму складають 15-20 дБ, (товщина матеріалу складала 10 мм), а для частот 4-8 кГц – 40-45 дБ, що навіть для більшості виробничих умов цілком прийнятне. З тако-

го матеріалу можливо виробляти кожухи та огорожувальні конструкції для потужного електротехнічного обладнання. Наприклад, напруженість магнітних полів турбогенераторів потужністю 150 МВт складають 1,6-1,7 кА/м на відстанях 10-15 м, а рівні шуму – 110-115 дБА.

Також потребують одночасного зниження рівнів електромагнітних полів та шуму у приміщеннях щитів керування енергетичних об'єктів та інших об'єктів критичної інфраструктури (наприклад, диспетчерських підприємств цивільної авіації).

Проблемою останніх є незадовільна якість повітря за аероіонним складом [9].

Причиною є електризація поверхонь, виготовлених з полімерних матеріалів.

Перевагою латексів є відсутність накопичення поверхневих зарядів у процесі експлуатації з будь-яких причин.

Тобто застосування електромагнітного та шумозахисного матеріалу на основі латексу не сприяє, на відміну від інших полімерів, деіонізації повітря. Але деіонізація обумовлюється також іншими чинниками – незадовільною якістю зовнішнього повітря, металеві вентиляційні канали тощо.

Тому для нормалізації та підтримання на нормативному рівні аероіонного режиму приміщень необхідно застосовувати іонізатори повітря. При цьому доцільне застосування ультразвукових іонізаторів [12], які додатково не генерують озон та сполуки азоту. Для рівномірного розподілу аероіонів застосовують розсіюючі екрани, які теж доцільно виготовляти на основі латексу, що знижує поглинання іонів поверхнею розсіювачої конструкції.

Наведено підходи, одночасно із застосуванням систем клімат-контролю дозволяють нормалізувати і підтримувати на нормативному рівні увесь комплекс фізичних факторів виробничого середовища.

## Висновки

1. Основними фізичними факторами виробничого та побутового середовища, рівні яких потребують корекції є електромагнітні поля, акустичний шум та концентрації аероіонів. Такі заходи доцільно запроваджувати на комплексній основі із урахуванням їх певного взаємозв'язку.

2. Застосування магнітних та електромагнітних екранів доцільно здійснювати з урахуванням акустичної обстановки. Вироблення екрана на основі пінолатексу дозволяє нормалізувати рівні електромагнітних полів та акустичного шуму. При цьому індекси зниження шуму (15-20 дБ на низькій частоті та 40-45 дБ на середній) прийнятне для будь-яких виробничих умов.

3. Перевагою латексів є відсутність накопичення на них поверхневих електростатичних зарядів, що знижує деіонізацію повітря приміщень. Їх доцільно використовувати для вироблення конструкцій для розсіювання потоків повітря від приладів штучної іонізації.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рябов Ю. Г., Гуров И. Б. Способ оценки электромагнитной безопасности. Патент на изобретение № 2398246 от 27.08.2010 г. (Ru). ДСТУ IES/ISO31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання.
2. Panova O.P., Krasnianskyi G. Iu., Aznaurian I. O. Evaluation of electromagnetic radiation shielding characteristics of facing building materials. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1164. 012057. DOI 10.1088/1757-899X/1164/1/012057
3. Зинкин В.Н., Богомолов А.В., Ахметзянов И.М., Шешегов П.М. Авиационный шум: специфические особенности биологического действия и защиты. 2012. Авиакосмическая и экологическая медицина. Т. 46. № 2. С. 9-16.
4. Биковський А.І., Громов М.Д., В.О. Шандра та ін. Методи та акустичні засоби віброшумозахисту на транспорті та будівництві. 2010. Наук.техн.зб.: Комунальне господарство міст. Вип. 91. С. 150-155.
5. Панова О. В. Захист працюючих від впливу електромагнітних полів екрануванням: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01. Панова Олена Василівна. Київ. 2014. 151 с.
6. Боганик А.Г. Эффективные конструкции для дополнительной звукоизоляции помещений. 2004. Строительные материалы. № 10. С. 18—19.
7. Старцева О.В., Овсянников С.Н. 2012. Исследование звукоизоляции однослойных и двухслойных перегородок. Жилищное строительство. № 6. С. 43—46.
8. Glyva V., Lyashok J., Matvieieva I., Frolov V., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B., Nikolaiev K. 2018. Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Iss. 6/5(96). P. 54–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150778>.
9. Касаткіна Н.В., Левченко Л.О., Панова О.В., Тихенко О.М., Ченчевой В.В. Оптимізація параметрів екранування електромагнітних полів різнорідних джерел у виробничих будівлях. 2020. ВІСТІ Донецького гірничого інституту №1 (46). С.181-188. ISSN 1999-981X. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-1-181-188>
10. Левашова Ю.С., Коваленко А.В., Косенко Н.А. Наслідки підвищеної чи зниженої іонізації повітря в робочому просторі приміщень. 2018. Науковий вісник будівництва. Х.: ХНУБА. ХОТВ, АБУ. Вип.3(93). С. 253
11. Латышенко К.П. Исследование электрофизических характеристик латексов, латексных пен и промышленной воды. 2006. Вестник ТГТУ. Т12.№2А. С.339-343.
12. Патент 147191, Україна МПК (2020.01), G12B 17/00 (2006.01), H05K 9/00. Спосіб виготовлення композиційного матеріалу для екранування іонізуючих та неіонізуючих електромагнітних випромінювань. Бурдейна Н.Б., Глива В.А., Касаткіна Н.В., Панова О.В., Осадчий Б.М., Халмуратов Б.Д.. Володілець: Бурдейна Н.Б., Глива В.А., Касаткіна Н.В., Панова О.В., Осадчий Б.М., Халмуратов Б.Д.. № u 2020 06476; заявл. 07.10.2020; опубл. 22.04.2021, Бюл. № 16.

Received (Надійшла) 22.07.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

**Application of electromagnetic shields in a set of measures  
to normalize the levels of physical environmental factors**

O. Panova

**Abstract.** Shielding is the most effective means of reducing the levels of electric, magnetic and electromagnetic fields of a wide frequency range in industrial and domestic conditions. But in real conditions, other physical factors also need to be corrected. It is shown that the most critical of them are acoustic noise and air ion composition. This necessitates the normalization of physical factors on an integrated basis. The use of pinolatex and an iron ore concentrate filler as a matrix for the electromagnetic shield allows the levels of electromagnetic fields and acoustic noise to be reduced to standard values. Even for the frequency bands of 31.5 Hz and 63 Hz with a screen thickness of 10 mm, the noise reduction indices are 15-20 dB. For frequencies 6-8 kHz, this figure is 40-45 dB, which is accepted for most industrial conditions. At the same time, the screening coefficients of magnetic fields of industrial frequency and electromagnetic fields of ultra-high frequency comply with regulatory requirements. It is shown that electrostatic charges which accumulate in the polymer air are the main factor in air deionization and they cause the directional movement of finely dispersed dust. Latex has the advantage of having a non-electric surface, which makes it possible to use it for cladding surfaces of large areas. At the same time, it has elastic modules, which are close in values to the modules of materials that are traditionally used for noise reduction. The most effective method for normalizing and maintaining the concentrations of air ions of both polarities at the standard level is the use of artificial air ionization devices. For uniform distribution of air ions in the volume of the premises, scattering screens are used. The advantage of latex screens is the absence of partial absorption of ions during scattering. The proposed approach to normalize the levels of electromagnetic fields of acoustic noise and the concentration of air ions, together with the use of climate control systems, allows maintaining the entire complex of physical factors of the industrial environment at the standard level. This is most relevant for the premises of critical infrastructure facilities (main control rooms, control rooms, etc.).

**Keywords:** physical factors, electromagnetic field, acoustic noise, shielding, air ions.

О. Ю. Іохов, В. Г. Малюк, Є. О. Каплун

Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна

## ОБҐРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ДО ЗАСОБІВ ЗНЕШКОДЖЕННЯ РАДІОКЕРОВАНИХ БОЄПРИПАСІВ

**Анотація.** Проаналізовано можливості застосування надширококутних сигналів для функціонального ураження радіокерованих боєприпасів для радіоелектронного захисту особового складу підрозділів НГУ. Показано, що найбільш перспективними є системи дискретно-безперервної дії, які використовують суміщений ємнісний накопичувач енергії з використанням генераторів імпульсних напруг Аркадьєва-Маркса і узгоджену з ним антенну систему, що дозволяє випромінювати електромагнітні імпульси високої інтенсивності. Оцінені енергетичні та просторові характеристики антенної системи засобу функціонального ураження радіокерованих боєприпасів.

**Ключові слова:** антитерористична операція, радіокерований боєприпас; функціональне ураження радіозасобу.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Умови виконання завдань з забезпечення національної безпеки України Національною гвардією України (НГУ), а саме боротьба з диверсійними, диверсійно-розвідувальними групами (ДРГ) противника та незаконними збройними формуваннями (НЗФ) під час зовнішнього або внутрішнього збройного конфлікту вимагають від застосування спеціальних заходів та засобів протидії використанню противником радіокерованих боєприпасів. Аналіз перебігу останніх конфліктів та наслідків терористичних атак показує на постійне застосування засобів дистанційного детонування вибухових пристроїв. Висока ефективність використання радіокерованих боєприпасів (РБП) пов'язана з можливістю контролю процесу їх детонування у реальному режимі часу. На даний час в НГУ відсутні будь-які засоби знешкодження радіокерованих боєприпасів тому проблема радіоелектронного захисту особового складу підрозділів НГУ при виконанні дій з забезпечення національної безпеки при застосуванні радіокерованих боєприпасів є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Одним із рішень зазначеної проблеми є застосування потужних електромагнітних імпульсів (ЕМІ) [1, 2]. Роботи, пов'язані з практичним використанням генераторів ЕМІ, досить добре відомі, наприклад [1, 3]. При розробці засобів радіоелектронного захисту вузьким місцем є саме антенна система. На даний час для автобронетанкової техніки Національної гвардії та інших силових структур України відсутні обґрунтування основних технічних вимог до засобів знешкодження РБП [2].

Таким чином, **мета статті** полягає у обґрунтуванні основних технічних вимог до засобів знешкодження радіокерованих боєприпасів для радіоелектронного захисту особового складу підрозділів НГУ.

### Основний матеріал

Проведений вище аналіз досліджень і наведені чисельні параметри радіокерованих боєприпасів дозволяють визначити енергетичні та просторові ха-

рактеристики антенної системи для функціонального подавлення (ФП) РБП [3].

Розглянемо наступний варіант.

1. Робоча частота роботи радіолінії становить 20 МГц, що відповідає довжині хвилі  $\lambda_{\text{тер}} = 15$  м.

2. Антена передавача і приймача є лінійна антена (вібратор), для якого коефіцієнт спрямованої дії (КНД)  $D = 1,5$  оскільки  $L \ll \lambda$ . У діапазоні 20 ... 100 МГц довжина вібратора складає 0,05 ... 0,1 $\lambda_{\text{тер}}$ . З міркувань скритності виберемо  $L = 0,05\lambda_{\text{тер}} = 75$  см. Тоді  $D = 0,05$ .

3. Виходячи з даних, наведених у роботах [4], чутливість приймача може бути обрана такою:  $U_{\text{min}} = 10$  мкВ.

4. Чутливість приймача, перерахована у напруженість електричного поля на вході, за умови, що коефіцієнт корисної дії (ККД) антенно-фідерного тракту  $\eta = 1$ , визначається виразом:

$$E_{\text{min}} = \sqrt{\frac{60U_{\text{min}}^2}{\lambda^2 D}} \approx 2,3 \text{ мкВ/м}. \quad (1)$$

5. Динамічний діапазон приймача становить 50 дБ. Тоді  $U_{\text{max}} = 0,1$  В,  $E_{\text{max}} = 0,23$  В/м.

Результати аналогічних розрахунків для інших можливих частот РБП зведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Величина напруженості електричного поля, що забезпечує нормальну роботу РБП

$f$ , МГц	$\Lambda$ , м	$L$ , м	$D$	$U_{\text{min}}$ , мкВ	$E_{\text{min}}$ , мкВ/м	$E_{\text{max}}$ , В/м
50	6	0,6	0,2	5	14,4	1,44
100	3	0,3	0,2	5	28,8	2,89
500	0,60	0,3	1	5	64,5	6,45
1000	0,30	0,15	1	2	51,6	5,16
2000	0,15	0,15	2	2	73	7,3
3000	0,10	0,1	2	2	110	11

Як зазначається в [5], динамічний діапазон приймача в значній мірі визначає його перешкодо-захищеність. Більшість існуючих способів завадо-захисту виявляється ефективним лише тоді, коли

рівень перешкоди не перевищує динамічний діапазон. Іншими словами, якщо сформувавши поле на заданій частоті, що перевищує  $E_{max}$ , то можна говорити про надійне блокування приймача, тобто про неможливість роботи РБП. Для оцінки величини напруженості електричного поля приземної хвилі, що розповсюджується від передавача РБП, скористаємося співвідношенням [6]:

$$E_{РБП} = \frac{1}{\sqrt{|\epsilon - j60\lambda\sigma|}} j \frac{120\pi IL \exp(-jkR)}{\lambda R}, \quad (2)$$

де  $\epsilon$ ,  $\sigma$  - діелектрична проникність і провідність Землі;  $L$  - лінійний розмір антени.

Для сухої землі відповідно до [6] з огляду на наведені вище дані отримаємо, що для  $f_{мер} = 20$  МГц і  $R = 50$  м з урахуванням втрат на трасі у випадку приповерхневого поширення електромагнітної хвилі (загасання 30 дБ на 50 м) і втрат на неузгодженість по поляризації (3 дБ)  $E_{РБП} = 1,64$  мВ / м. При зменшенні довжини радіолінії (відстань між передавачем сигналу на підшив і прийомним пристроєм РБП) зменшується коефіцієнт захисту, що будемо вважати неприпустимим. При прийнятих вихідних даних аналогічні значення виходять і для частоти  $f_{мер} = 50$  МГц.

Припустимо, що радіочастоти діапазону 20 ... 50 МГц не використовуватимуться на відкритих ділянках дороги для ураження колони військової техніки (бронетехніки) з міркувань скритності. Тому для подальших розрахунків виберемо робочий діапазон РБП 100 ... 3000 МГц. Для визначення можливостей функціонального ураження РБП скористаємося результатами робіт [7], в яких визначені відповідні рівні потужності, що викликають деградацію напівпровідникових приладів приймальних пристроїв при внутрішньосмуговому та позасмуговому впливах електромагнітного випромінювання.

Енергетичний поріг для досягнення ефекту деградації радіоелектронних елементів визначається часом релаксації теплових процесів, яке для напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем становить  $\tau_p \geq 10 \dots 100$  нс [8]. При виконанні умови

$\tau_n \leq \tau_p$  для посилення теплового впливу, що викликає деградацію радіоелементів, потрібні періодичні послідовності надширокопосмугових (НШС) сигналів. Вираз для оцінки необхідної потужності на вході напівпровідникового приладу, що приводить до його деградації, має вигляд [9]:

$$P_{дегр} = K_n S_{p-n} / \sqrt{\tau_\Sigma}, \quad (3)$$

де  $K_n$  - постійна пошкодження, що залежить від типу напівпровідникового приладу;  $\tau_\Sigma$  - сумарний час впливу послідовності імпульсів на РЕЗ, що вражаються;  $S_{p-n}$  - площа p-n переходу в см<sup>2</sup>.

Вираз (3) дозволяє визначити сумарну потужність, необхідну для деградації елементів при впливі на неї періодичної послідовності імпульсів при внутрішньосмуговому впливі

$$P_{дегр}^{int} = P_{дегр} K_{сн} \quad (4)$$

і позасмуговому впливі

$$P_{дегр}^{ext} = P_{дегр} K_{сч}, \quad (5)$$

де  $K_{сн}$  - коефіцієнт, що враховує розбіжність ширини спектра НШС сигналу і смуги пропускання приймального тракту;  $K_{сч}$  - коефіцієнт, що враховує величину розбіжності середньої частоти спектра НШС сигналу і робочої частоти приймального пристрою РБП. У табл. 2, 3 наведено оцінки значень потужності при внутрішньосмуговому і позасмуговому впливі, достатньому для деградації радіоелектронних елементів при впливі пачки ультракоротких імпульсів тривалістю  $\tau_\Sigma = 100$  мс (НП - напівпровідникові, ІС - інтегральні, ВІС - великі інтегральні схеми) [7].

Порівняльний аналіз табл. 2 і 3 показує, що енергетично більш вигідним є режим внутрішньосмугового впливу, який називається також режимом "через вхідні двері". У разі ФП РБП саме цей режим буде мати місце, оскільки передбачається, що кожне вибуховий пристрій забезпечений антеною і налаштований на конкретну, заздалегідь невідому довжину хвилі.

Таблиця 2 - Оцінка потужності  $P_{дегр}^{int}$ , мВт

Тип НП приладу	$K_n$	$S_{p-n}$ , см <sup>2</sup>	$\tau_\Sigma$ , мс	$P_{дегр}^{int}$	
				$K_{сн} = 10$ дБ	$K_{сн} = 15$ дБ
Діоди НП, транзистори	0,1	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	$10^2$	$3 - 2 \cdot 10^2$	$10 - 5 \cdot 10^2$
Діоди НВЧ	0,01	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	$10^2$	0,3 - 20	1 - 50
ІС та ВІС	0,1	$10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$	$10^2$	0,3 - 6	1 - 20

Таблиця 3 - Оцінка потужності  $P_{дегр}^{ext}$ , мВт

Тип НП приладу	$K_n$	$S_{p-n}$ , см <sup>2</sup>	$\tau_\Sigma$ , мс	$P_{дегр}^{ext}$ , мВт	
				$K_{ен} = 30$ дБ	$K_{ен} = 40$ дБ
Діоди НП, транзистори	0,1	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	$10^2$	$3 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$
Діоди НВЧ	0,01	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	$10^2$	$3 \cdot 10^1 - 2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^4$
ІС та ВІС	0,1	$10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$	$10^2$	$3 \cdot 10^1 - 6 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^2 - 6 \cdot 10^3$

Як видно з табл. 2, максимальна потужність для внутрішньосмугового придушення, необхідна для деградації напівпровідникових діодів і транзисторів

становить величину 500 мВт. Використовуючи дані табл. 1, можна розрахувати потужність сигналу, необхідну для ФП вибухового пристрою (табл. 4).

Таблиця 4 – Потужність сигналу, достатня для нормальної роботи РБП

$f$ , МГц	$\lambda$ , м	$L$ , м	$D$	$P_{np}^{max}$ , Вт
50	6	0,6	0,2	$3,13 \cdot 10^{-3}$
100	3	0,3	0,2	$3,13 \cdot 10^{-3}$
500	0,60	0,3	1	$3,13 \cdot 10^{-3}$
1000	0,30	0,15	1	$5 \cdot 10^{-4}$
2000	0,15	0,15	2	$5 \cdot 10^{-4}$
3000	0,10	0,1	2	$5 \cdot 10^{-4}$

Для досягнення максимальної потужності 500 мВт (табл. 2), що забезпечує деградацію діодів і транзисторів, відповідна напруженість електричного поля буде мати величину: для 50 МГц -  $E = 18$  В / м; для 100 МГц -  $E = 37$  В / м; для 500 МГц -  $E = 82$  В / м; для 1000 МГц -  $E = 165$  В / м; для 2000 МГц -  $E = 217$  В / м; для 3000 МГц -  $E = 308$  В / м [9].

Виходячи з тактичних міркувань розташування НШС засобу ФП РБП в бойових порядках колони, що рухається, виберемо максимальну дальність роботи постановника перешкод  $R_{non} = 20$  м.

Для оцінки геометричних розмірів антенної системи в якості розрахункової виберемо середню частоту спектра НШС сигналу [10]:  $f_0 = 1,5$  ГГц, для якої  $E_{non}(f_0) = 180$  В/мГц. Відповідно до формули ідеального радіозв'язку (2) для направлення головного максимуму антенною системою:

$$E_{ном} = \sqrt{60P_{\Sigma}D_{ном}}/R_{ном}, \quad (6)$$

де  $P_{\Sigma}$  – пікова потужність передавача перешкод (на частоті 1,5 ГГц),  $D_{ном}$  – максимальний КНД антени НШС засоби функціонального ураження, отримаємо, що  $P_{\Sigma}D_{ном} \approx 216$  кВт.

На рис. 1 наведена залежність між коефіцієнтом посилення (КУ) антенної системи і потужністю, що підводиться, розрахована відповідно до (2) для зазначених значень напруженості електричного поля і дальності. Як показує аналіз літератури [11], на сьогоднішній день реально досяжні мегаватні рівні потужності, що генерується для мобільних установок при допустимих масогабаритних розмірах. Діаграма спрямованості (ДС) антенної системи повинна бути якомога більш вузькою (КНД високим) для зменшення впливу на сусідні радіозасоби і системи зв'язку. Разом з тим збільшення КНД пов'язано з ростом геометричних розмірів антенної системи.

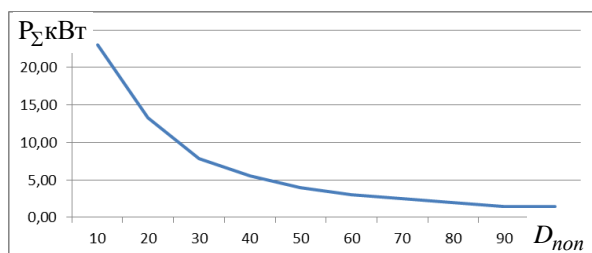


Рис. 1. Співвідношення між КНД антенної системи і потужністю, що підводиться

Необхідно враховувати, що для зменшення втрат по поляризації бажано використовувати антену з круговою поляризацією випромінюваного поля. В якості такої антени пропонується використовувати параболюїд обергання з опромінювачем у вигляді конічної спіральної антени, що збуджується НШС сигналом відеоімпульсного типу наносекундної тривалості. Припустимо, що КНД антенної системи  $D_{max} = 100$ . КУ, який визначається як  $G = D\eta$  ( $\eta$  – ККД), буде менше КНД і, в загальному випадку, залежить від електричних характеристик антенно-фідерної системи. Використовуючи співвідношення [1]:

$$D_{max} = 25000 \div 30000 / (2\Theta_{0,5P}^0 2\Phi_{0,5P}^0), \quad (7)$$

де  $2\Theta_{0,5P}^0, 2\Phi_{0,5P}^0$  - ширина ДС в кутомісцевій і азимутальній площинах відповідно в градусах, знайдемо, що для антени з голчастою ДС величина ширини діаграми спрямованості буде  $15,80^\circ$ . З огляду на те, що ширина ДС може бути оцінена як [1]

$$\Theta_{0,5P}^0 = \lambda/d, \quad (8)$$

де  $\lambda$  - середня довжина хвилі;  $d$  - діаметр апертури, знайдемо, що розмір апертури становить 0,875 м.

Для збільшення опору випромінювання необхідно збільшувати електричні розміри антенної системи, а також те, що найменша частота спектра  $f_{mer} = 100$  МГц ( $\lambda = 3$  м), остаточно виберемо діаметр дзеркальної антени  $d = 1$  м. При цьому далека зона антени складе  $R \geq 2d^2 / \lambda_{min} = 20$  м.

Відповідно до даних рис. 1 для КНД антени  $D = 100$  потужність надширококутвого засобу ФП РБП складе величину  $P_{\Sigma} = 2,2$  кВт з урахуванням втрат на трасі при поширенні уздовж поверхні Землі. При висоті антени 2 м і дальності дії  $D_{non} = 20$  м діаметр "плями", яка формується основною пелюсткою ДС НШС антени складе величину  $d_n = 24$  м. З огляду на те, що застосування іскрових генераторів має обмеження за кількістю випромінюваних сигналів (1 ÷ 3 млн спрацьовувань для бронзових і нікелевих електродів), припустимо, що використовується послідовність з 10 надширококутвих сигналів, період проходження яких складає  $T_n = 10$  мс. У підсумку сформована послідовність матиме тривалість  $\tau_{\Sigma} = 100$  мс. Таким чином, на 8 м руху колони буде використовуватися послідовність з 10 надширококутвих імпульсів, потужність кожного з яких складає  $P = 220$  Вт. Вважаючи кількість розрядів іскрового генератора Аркадьєва-Маркса рівним 1 млн., і з огляду на обмеження по потужності отримаємо, що безперервна дія НШС засобів функціонального ураження радіокерованих беспірипасів може використовуватися приблизно на 280 км шляху.

За наведених вище даних можна розрахувати величину коефіцієнта захисту (2). У припущенні, що  $P_n = 1$  Вт,  $G_n = 2$ ,  $\Delta f_{np} = 20$  кГц,  $P_{\Sigma}G_{non} = 2,16$  кВт,  $\Delta f_{non} = 3$  ГГц, отримаємо, що  $K = 0,4$ . Отримане значення є припустимим при віддаленні терориста від місця закладення РБП на 50 м.

## Висновки

Проаналізовано можливості застосування надширококузових сигналів для функціонального ураження радіокерованих боєприпасів. Показано, що найбільш перспективними НШС системами є системи дискретно-безперервної дії, які використовують суміщений смісний накопичувач енергії з використанням генераторів імпульсних напруг Аркадьєва-Маркса і узгоджену з ним антенну систему, що дозволяє випромінювати електромагнітні імпульси високої інтенсивності з напруженістю електричного поля до декількох кВ/м і тривалістю фронту близько 100 пс.

Оцінені енергетичні та просторові характеристики антенної системи засобу функціонального ураження радіокерованих боєприпасів. Встановлено, що при постановці загороджувальної НШС перешкоди на дальності у 20 м необхідно мати енергетичний потенціал величиною 220 кВт з урахуванням

втрат на поширення уздовж поверхні Землі. Для зменшення масо-габаритних розмірів передавача пропонується використовувати гостронаправлену антенну систему з КНД=100.

Запропоновано використовувати послідовність з 10 надширококузових сигналів, період проходження яких складає  $T_n = 10$  м/с. Сформована послідовність матиме тривалість  $\tau_s = 100$  мс. Показано, що при ширині пікової ДС дзеркальної антени  $8^\circ$ , при дальності дії засоби функціонального ураження радіокерованих боєприпасів 20 м ширина зони ураження, сформованої ДС антени, становить величину 16м. При використанні послідовності з 10 надширококузових імпульсів, пікова потужність кожного з яких буде  $P_{\text{пик}} = 220$  Вт і кількості розрядів іскрового генератора Аркадьєва-Маркса рівним 1 млн, отримаємо, що безперервна дія надширококузових засобів функціонального ураження радіокерованих боєприпасів розрахована на 280 км шляху.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шифрин Я.С. Антенны: Учеб. Пособие / Я.С. Шифрин. – Х.: ВИРТА, 1976. – 407 с.
2. Власик С.Н. Оценка энергетических и пространственных характеристик сверхширокополосной РТС для постановки заградительных помех / Г.В. Ермаков, С.Н. Власик // Системы обработки информации: 36. науч. пр. – Х.: ХУПС. – 2009. – Вып. 6 (80). – С. 43–48
3. Власик С.Н. Методика определения диаграммы направленности сверхширокополосной зеркальной антенны с учетом взаимного влияния облучателя и рефлектора / М.Г. Иванец, Г.В. Ермаков, В.В. Воинов, С.Н. Власик // 36. науч. пр. Хар. ун-ту Повітряних Сил. – Х.: ХУПС. – 2009. – Вып. 1 (19). – С. 39–41.
4. Хабаров В.Б. Еще раз о перспективах развития радиоуправляемых взрывных устройств и способов борьбы с ними / В.Б. Хабаров // Специальная техника. – 2004. – № 1. – С. 16–24.
5. Седышев Ю.Н. Приемные устройства радиолокационных сигналов / Ю.Н. Седышев, Л.К. Никонов, И.В. Васильев, В.И. Гапон. – М.: Воениздат, 1978. – Ч. 1. – 328 с
6. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М.: Сов. радио, 1972. – 464 с.
7. Сахаров К.Ю. Исследование функционирования персональных компьютеров в условиях воздействия сверхкоротких ЭМИ / К.Ю. Сахаров, О.В. Михеев, В.А. Туркин // Технологии ЭМС. – 2006. – № 2 – С. 44–49.
8. Титов С.В. Применение пространственно-фазово-частотного фокусирования плоской ФАР для функционального поражения радиотехнических средств короткими импульсами / С.В. Титов // 36. науч. пр. Харків. ун-ту Повітряних Сил. – 2003. – № 1(44). – С. 97–101.
9. Vlasik S.N. Estimation power and spatial characteristics of ultrawideband radar for statement of protecting handicaps / S.N. Vlasik, G.V. Yermakov, I.I. Zima // Матеріали 5-й науч.-техн. конф. ["Ultrawideband and Ultrashort impulse Signal"]: М-во образования и науки Украины, Сев. нац. техн. ун-т. – Севастополь: СевНТУ, 2008. – 92 с
10. Власик С.Н. Определение мощности сверхширокополосной непреднамеренной помехи на входе приемника системы связи / С.Н. Власик, Г.В. Ермаков // Системы управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НУ. – 2010. – Вып. 2 (14). – С. 44–48.
11. Магда И.И. Стендовая база для испытаний радиоэлектронной аппаратуры на электромагнитную совместимость и стойкость к излучениям сверхкороткой длительности // 3-й Межд. радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008: Сб. науч. тр. Том VI. – Х.: АНПРЭ, ХНУРЭ. – 2008. – С.7–11.

Received (Надійшла) 10.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.08.2021

## Justification of basic technical requirements for means of clearing radio-controlled ammunition

O. Iohov, V. Maliuk, Y. Kaplun

**Abstract.** The possibilities of using ultra-wideband signals for the functional destruction of radio-controlled ammunition for electronic protection of personnel of NSU subdivisions are analyzed. It is shown that the most promising are discrete-continuous systems that use a combined capacitive energy storage using Arkadyev-Marx pulse voltage generators and an antenna system matched to it, which makes it possible to emit high-intensity electromagnetic pulses. The energy and spatial characteristics of the antenna system of the means of functional destruction of radio-controlled ammunition are estimated. It is established that when setting up a barrier NSC obstacle at a distance of 20 meters, it is necessary to have an energy potential of 220 kW, taking into account the loss of propagation along the Earth's surface. To reduce the mass and dimensions of the transmitter, it is proposed to use a pointed antenna system. It is proposed to use a sequence of 10 ultra-wideband signals, the period of passage of which is  $T_n = 10$  m / s. The generated sequence will have a duration  $\tau_s = 100$ . It is shown that at the width of the peak DS of the mirror antenna  $8^\circ$ , at the range of the means of functional destruction of radio-controlled ammunition 20 meters, the width of the damage zone formed by the antenna pattern is 16 meters.

**Keywords:** anti-terrorist operation, radio-controlled ammunition, functional damage to radio equipment.

В. В. Князев<sup>1</sup>, В. І. Кравченко<sup>1</sup>, Б. О. Лазуренко<sup>2</sup>, О. А. Серков<sup>2</sup>, К. А. Трубочанінова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія», Харків, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

<sup>3</sup> Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

## МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ МОБІЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

**Анотація.** Предметом розгляду статті є процеси забезпечення електромагнітної сумісності в самоорганізованій безпроводній мережі шляхом застосування надширокосмугових сигналів з високою інформаційною ємністю. **Мета** – розробка рекомендацій щодо реалізації безпроводного мобільного рухомого зв'язку при передачі дискретних повідомлень каналом зв'язку з адитивним гаусовим шумом. **Задача** – забезпечення усталеної та надійної роботи надширокосмугової системи зв'язку. Використані **методи**: методи аналітичного моделювання та теорії потенціальної завадостійкості. Отримані наступні **результати**. Розроблено критерій забезпечення вимог електромагнітної сумісності мобільних телекомунікаційних систем. На ґрунті теорії потенціальної завадостійкості показана можливість усталеної та беззавадової роботи телекомунікаційної безпроводної системи в умовах, коли рівень інформаційного сигналу та шуму мають одне значення. Доведена можливість вилучення переданого інформаційного сигналу із суміші шуму та корисного сигналу шляхом кореляції прийнятого та опорного сигналів. **Висновки.** Показано, що використання технології надширокосмугових сигналів дозволяє здійснити безпроводну приховану передачу інформації з малою потужністю випромінювання. Причому велика база сигналу дозволяє забезпечити усталену та беззавадову роботу телекомунікаційної системи зв'язку за умов, коли рівень інформаційного сигналу знаходиться на рівні чи нижче рівня шуму. При цьому доведена можливість вилучення корисного сигналу із суміші інформаційних двійкових сигналів та білого гаусового шуму.

**Ключові слова:** рухомий зв'язок; завадостійкість; база сигналу; критерій емс; кореляція.

### Вступ

Стрімкий розвиток мобільних систем зв'язку, Internet та безпроводних локальних мереж робить все більш пріоритетним вирішення проблеми забезпечення відповідного рівня електромагнітної сумісності (ЕМС) в сучасній безпроводній техніці зв'язку.

У той же час існуючий радіочастотний ресурс перевантажено (рис. 1), що викликає зниження рівня завадозахищеності систем та якості наданих послуг (QoS). Також нагальною стає проблема забезпечення високої щільності каналів зв'язку, їх пропускної здатності та завадостійкості в умовах дії ненавмисних та навмисних завад [1 - 3].

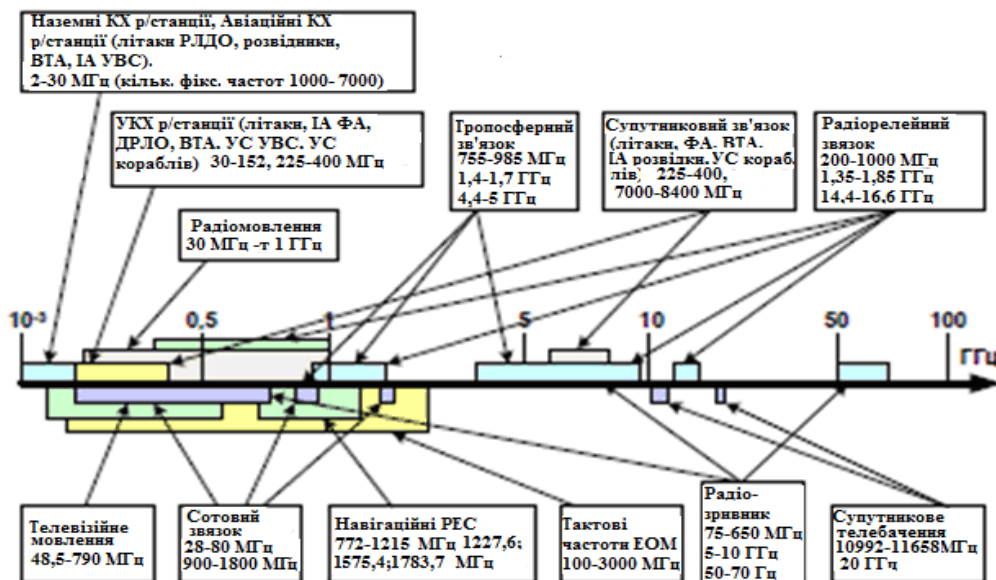


Рис. 1. Розподіл за робочими частотами засобів зв'язку і навігації

Існує низка методів, які базуються на розподілі між окремими засобами мобільного зв'язку таких параметрів, як частота, час, код і простір із мінімумом взаємних завад та максимальним використанням характеристик середовища передачі [4]. Найбільш поширеними є метод багатоканального зв'язку з часовим розподілом (TDMA) та частотним

розподілом (FDMA). Їх загальним позитивним моментом є уникнення взаємних завад між сусідніми щільно розташованими каналами зв'язку шляхом використання у різних каналах ортогональних сигналів.

При цьому умовами ортогональності сигналів в часовій області  $x(t)$ , де  $i = 1, 2, \dots$ , є виконання умов:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x_i(t)x_j(t)dt = \begin{cases} 1, & \text{коли } i = j; \\ 0, & \text{коли } i \neq j. \end{cases}$$

Аналогічно, у випадку виконання цих умов, сигнали ортогональні і в частотній області. Обидва методи TDMA і FDMA є найбільш розповсюдженими, суміщення яких дозволяє реалізувати метод багатоканального зв'язку із кодовим розподіленням каналів (CDMA), суть якого полягає у використанні надширококутових сигналів (НШС), що дає змогу віднести його до п'ятого покоління систем радіозв'язку. Причому надширококутовими вважаємо такі сигнали, для яких виконується співвідношення:

$$B = F_c T_c \gg 1,$$

де  $B, F_c, T_c$  – база, ширина спектру і тривалість сигналу відповідно.

За рахунок створення складних сигнально-кодових конструкцій інформаційного сигналу шляхом одночасного застосування процесів кодування та модуляції отримуємо сигнал, який займає більшу смугу частот, має значно меншу його інтенсивність у порівнянні з сигналом що реалізовано їх послідовними процесами та дозволяє забезпечити більш високу ефективність та енергетичний вигнаш [5 – 7]. Розширення спектру призводить до того, що сигнал більш рівномірно та менш щільно розподіляється у визначеній області спектру. Таким чином, не тільки підвищується завадостійкість інформації, но і знижується імовірність його перехоплення. Це обумовлено тим, що не маючи синхронізованої копії розширюючого сигналу, він буде губитися у шумі. З огляду на те, що вирішення проблеми організації якісного мобільного зв'язку та захисту інформації в безпроводних радіомережах полягає у зниженні рівня завадової електромагнітної обстановки (ЕМО), то технологія НШС сигналів є найбільш придатною для її практичного застосування. Суть її полягає у передачі малопотужних кодованих імпульсів в дуже широкій смузі частот без несучої частоти. Причому ширококутовість системи визначає не абсолютна величина ширини використаної смуги частот, а співвідношенням спектру повідомлення, який визначено швидкістю отримання інформації, та шириною спектра сигналу. Припустимо, що  $\Delta F$  є шириною спектру повідомлення,  $W$  – ширина спектру сигналу, а  $T$  – тривалість сигналу. Добуток  $B = WT$  є базою сигналу. Зазвичай для ширококутових систем  $W \gg \Delta F$  та  $B \gg 1$ . Розширюючи смугу частот із  $\Delta F$  до  $W$  виникає можливість збільшення швидкості передачі інформації, укорочуючи передані сигнали з величини  $T \cong 1/\Delta F$  до  $T_1 \cong 1/W$ , причому  $T_1 \ll T$ . Таким чином до переданого сигналу вводять деяку надмірність, величину якої визначає коефіцієнт розширення спектру  $K_f = W/\Delta F$ . Саме наявність цієї надмірності визначає такі властивості надширококутових систем, як можливість переборення явища багатопроменевості, усталеність до завад, та можливість ефективного використання спектру під час використання перевантаженого частотного діапазону та цифрової обробки сигналу.

Зниження рівня електромагнітного випромінювання є основним методом забезпечення ЕМС в системах безпроводного мобільного зв'язку [8-10]. Тому сприйнятливим щодо забезпечення усталеної беззавадової роботи є зниження рівня інформаційного сигналу на вході приймача до рівня шуму. Це обумовлює критерій щодо забезпечення вимог ЕМС телекомунікаційних систем безпроводного мобільного зв'язку.

### Критерій забезпечення вимог ЕМС мобільних телекомунікаційних систем зв'язку

Згідно теорії потенціальної завадостійкості Котельнікова В.А. [11] гранично досяжною межею зниження рівня інформаційного сигналу для усіх без винятку класів приймальних систем є відношення подвійної енергії сигналу  $E$  до спектральної щільності потужності шуму  $N_0$  що складає величину:

$$Q = 2E/N_0 = 2q_0B,$$

де:  $q_0 = \frac{E/T}{N_0W}$  – відношення середньої потужності сигналу  $P_{s0} = E/T$  до потужності шуму  $P_{N0} = N_0W$  на вході приймача, а  $B = WT$  є базою сигналу.

Зазвичай, нижня межа співвідношення спектральних щільностей сигналу  $N_s$  та завади  $N_0$  складає 7 дБ на вході приймача, що гарантує його нормальну роботу. Таким чином цей рівень відповідає наступному співвідношенню:

$$\frac{N_s}{N_0} \leq 0,2. \quad (1)$$

У той же час спектральну щільність  $N_s$  визначають наступним співвідношенням:

$$N_s = P/W = E/W T, \quad (2)$$

де  $P$  – потужність сигналу;  $W$  – ширина спектру сигналу;  $E$  – енергія сигналу;  $T$  – тривалість сигналу.

З урахуванням співвідношень (1), (2) критерієм виконання вимог ЕМС стає вирішення наступної нерівності:

$$E/W T N_0 \leq 0,2. \quad (3)$$

При цьому співвідношення (3) прийме наступного вигляду:

$$q^2/W T \leq 0,4, \quad (4)$$

де сам критерій визначено у термінах відношення сигнал / шум на вході приймача  $q$  та виграшу від обробки  $WT$ .

Таким чином задача полягає в обранні такого виграшу від обробки сигналу, який би гарантував достатньо низький рівень його спектральної щільності  $N_s$  відносно спектральної інтенсивності природного шуму  $N_0$  на вході приймача. При цьому критерієм якості каналу мобільного цифрового зв'язку та забезпечення вимог ЕМС є відношення сигнал/шум (SNR, Signal-to-noise ratio).

Можливість подальшого підвищення потенційної завадостійкості приймальних пристроїв обгрун-

тував Слепян Д. [12] у своїй теоремі, застосування якої справедливе тільки у тих випадках, коли ширина спектру сигналу більша, ніж ширина спектру шуму. Таким чином, єдино можливим шляхом підвищення рівня завадостійкості із підтримкою якості обслуговування в безпроводних телекомунікаційних радіомережах є застосування надширокопосмугових (НШС) сигналів із нелінійною обробкою їх спектрів.

### Методи забезпечення EMC мобільних систем рухомого зв'язку

В цифрових телекомунікаційних системах якість мобільного зв'язку та відповідний рівень EMC забезпечують двома методами: стрибкоподібної переналаштування частоти (Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS) та прямої послідовності (Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS). Обидві ці методи передбачають розподіл всієї широкої смуги частот на  $n$  підканалов. Кожний із цих методів має свої вади. Однак, устаткування FHSS значно простіше й дешевше, а також має більшу стійкість до широкопосмугових завад.

**Метод стрибкоподібного переналаштування частоти FHSS.** При застосуванні методу FHSS станція у кожний момент часу передає інформацію тільки по одному з  $n$  підканалов, регулярно перемикаючись на інший підканал. Ці перемикання відбуваються синхронно на передавачі і приймачі, причому їх послідовність носить псевдовипадковий характер і заздалегідь відомий тільки даній парі «передавач-приймач». Для реалізації такого перемикання використовують властивості перетворення Фур'є, за яким здійснюючи згортку інформаційного сигналу із допоміжною функцією, наприклад, експоненціальною, отримуємо у часовій області перенесення спектру інформаційного сигналу до іншого діапазону у частотній області. Таким чином, маючи низку допоміжних імпульсних функцій з'являється можливість для реалізації стрибкоподібного переналаштування спектру частот інформаційного сигналу до іншого частотного діапазону. При цьому приймальне обладнання вимірює потужність радіосигналу і рівень завад, та на основі отриманих результатів формується список вільних та зайнятих каналів для подальшого обрання каналу. До списку включено інформацію про стан каналу зв'язку, де низьке значення потужності сигналу та відсутність завад в них свідчить про наявність вільних каналів. Та навпаки, присутність великого рівня сигналу в каналі та/або сильних завад свідчать про його зайнятість. Ця інформація дозволяє при встановленні з'єднання обирати найбільш оптимальний канал зв'язку за найменшим рівнем завад. Сканування доступних каналів відбувається як мінімум один раз за 30 сек. Запис даних про якість зв'язку кожним приймально-передавальним пристроєм здійснюють у вигляді таблиці якості зв'язку (The Link Quality Table), що являє собою двовимірний масив. На основі записаних поточних значень даних про якість зв'язку передають інформацію за маршрутом, що забезпечує якість зв'язку, яка перевищує або дорівнює заданому пороговому значенню. Фрагмент самоорганізованої безпроводної мережі наведено на рис. 2.

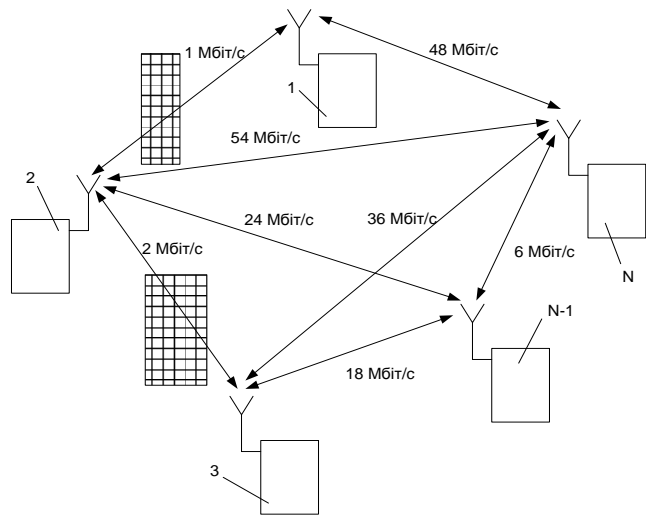


Рис. 2. Організація зв'язку в самоорганізованій безпроводній мережі

Завдяки такому безперервному динамічному вибору та наданню каналів зв'язку здійснюється ефективне використання радіочастотного ресурсу та забезпечуються вимоги EMC в системах безпроводного мобільного зв'язку.

**Метод прямої послідовності DSSS.** При реалізації методу DSSS кожен біт інформації кодується у вигляді послідовності з  $n$  біт, а всі ці  $n$  біт передаються паралельно по всім  $n$  підканалам, причому алгоритм кодування індивідуальний для кожної пари «передавач-приймач», забезпечуючи, таким чином, конфіденційність передачі. Цей метод дозволяє досягати більшої пропускної здатності і, завдяки  $n$ -кратній надмірності, забезпечує більшу стійкість до вузькосмугових завад та дозволяє використовувати інформаційні сигнали дуже низької потужності, не створюючи завад звичайним радіопристроєм.

Подальше удосконалення методу DSSS з метою підвищення рівня завадостійкості телекомунікаційних систем зв'язку здійснюють шляхом застосування НШС сигналів з нелінійною обробкою їх спектрів [12]. Реалізацію такого підходу здійснюють наступним чином.

Інформаційний двійковий сигнал спочатку розширюють шляхом множення його на розширюючу кодову послідовність сигналів у вигляді потоку елементарних сигналів – чипів та випромінюють його до вільного простору.

Таким чином здійснюють одночасне завадостійке кодування та модуляцію інформаційного біту, створюючи складну сигнально-кодову конструкцію [13, 14].

Для створення в одній смузі частот низки незалежних, захищених від завад каналів зв'язку додатково застосовано систему ортогональних кодів. При цьому основне положення кожного чипу зрушують на час, пропорційне поточному значенню деякої псевдовипадкової послідовності, додатково здійснюючи зсув його у часі на один-два порядки вище, ніж при попередньому часовому позиційно – імпульсному кодуванні. В результаті спектр двійкового сигналу істотно згладжується, стає шумоподібним та вже не заважає іншим пристроям, які працюють у



тій же смузі. Завдяки широкосмужності сигналу знижується його потужність, причому на дуже довгій базі – нижче рівня білого шуму. Застосовуючи систему ортогональних кодів для управління часовими затримками чипів, здійснюють багатоканальний зв'язок захищеної інформації в рухомих телекомунікаційних системах. Таким чином до безпроводної радіомережі надходять НШС сигнали з періодичною кодовою модуляцією спектра у відповідності з потоком двійкових інформаційних символів.

У той же час широка смуга частот та надкоротка тривалість чипів висувають підвищені вимоги до точності синхронізації. Інформаційні сигнали та сигнали синхронізації знаходяться на одному енергетичному рівні, а спектральна щільність усіх каналів знаходиться на рівні шумів, тому система значною мірою зазнає погіршення значень імовірності бітової похибки. Зменшити рівень внутрішньосистемних завад та бітової похибки дозволяє метод формування ансамблю складного НШС інформаційного сигналу шляхом часового розділення опорного та інформаційного сигналів, схема реалізації якого наведено на рис. 3.

В схемі передавача застосовано трипозиційний комутатор, який протягом першої половини бітового інтервалу замикає вихід передавача безпосередньо на генератор НШС сигналу (G).

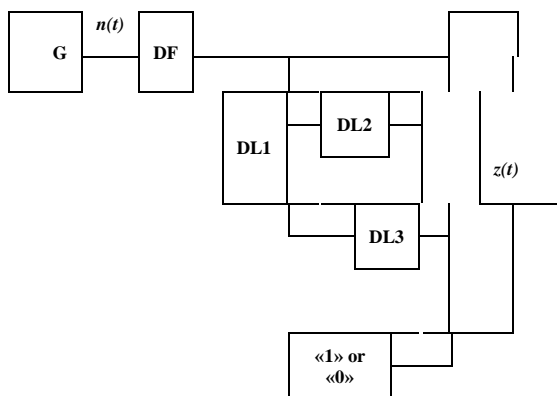


Рис. 3. Схема формування ансамблю складного НШС інформаційного сигналу

Таким чином протягом періоду часу  $T_s/2$  формують опорний НШС сигнал. В середині бітового інтервалу здійснюють переключення комутатора до однієї з двох можливих позицій в залежності від потоку двійкових бітів «одиниця» чи «нуль» від джерела інформації. При цьому лінія затримки DL1 забезпечує затримку сигналу  $x(t)$  на половину бітового інтервалу  $T_s/2$ , а лінії затримки DL2 та DL3 задіяні безпосередньо для формування потоку двійкових бітів. В результаті формується ансамбль складного сигналу, де інформаційний сигнал, відокремлено у часі від опорного, та на одному інтервалі  $T_s$  має такий вигляд.

$$y(t) = \begin{cases} x(t), & 0 \leq t \leq \frac{T}{2}; \\ x\left(t - \frac{T}{2} - T_0\right), & \frac{T}{2} \leq t \leq T; \\ x\left(t - \frac{T}{2} - T_1\right), & \frac{T}{2} \leq t \leq T; \end{cases}$$

У вільному просторі на розширений сигнал, смуга частот якого дорівнює смузі частот кодового сигналу – чипу, впливає зовнішня завада. Прийняту суміш ансамблю складного НШС інформаційного сигналу та завади в приймачі повторно множать на синхронізовану копію розширюючого сигналу. В результаті отримуємо звужений інформаційний сигнал та сигнал завади, спектр якого буде розширено по всьому частотному діапазону цього сигналу. Будь-який небажаний сигнал, отриманий у приймачі, буде розширено шляхом множення таким же чином, як передавач розширює інформаційний сигнал. Це обумовлено тим, що інформаційний сигнал множать двічі, тоді як сигнал завади множать на розширюючий опорний сигнал тільки один раз. Подальше фільтрування та кореляційний прийом ансамблю складного НШС інформаційного сигналу дозволяє однозначно відтворити переданий інформаційний сигнал.

Корелятор виконує згортку прийнятого сигналу з опорним, здійснюючи когерентний стиск прийнятого ансамблю сигналів до смуги частот переданих повідомлень шляхом подвійного спектрального перетворення [15].

Так при прийомі двійкової одиниці кореляційна функція дорівнює +1, а при прийомі двійкового нуля – приймає значення -1.

У будь-яких інших випадках кореляційна функція дорівнює нулю. Накопичення в кореляторі приймача за час прийому інформаційного біту певної кількості чипів, що кодують кожен з інформаційних бітів, дає можливість суттєво підвищити співвідношення сигнал/шум, забезпечуючи можливість передачі інформації в широкому частотному діапазоні значно нижче рівня білого шуму [16], забезпечуючи таким чином вимоги ЕМС для рухомих мобільних пристроїв.

### Аналіз

Аналіз проблеми забезпечення вимог електромагнітної сумісності рухомих мобільних безпроводних пристроїв показав, що основним методом її вирішення є зниження рівня випромінювання електромагнітних полів.

На ґрунті теорії потенціальної завадостійкості Котельнікова В.А. показана можливість усталеної та беззавадової роботи телекомунікаційної безпроводної системи в умовах, коли рівень інформаційного сигналу та шуму мають одне значення. Показана можливість вилучення переданого інформаційного сигналу із шуму шляхом кореляції прийнятого та опорного сигналів.

### Висновки

Використання технології НШС зв'язку з розподілом у часі синхроімпульсу та інформаційного сигналу дозволяє гарантовано забезпечити вимоги щодо завадостійкості, прихованості і безпеки каналів безпроводного мобільного зв'язку на усіх етапах їх розробки, виготовлення та експлуатації. Це дозволяє здійснити безпроводну приховану передачу інформації з малою потужністю випромінювання.

Застосування великої бази сигналу дає змогу забезпечити усталену та беззаводову роботу телекомунікаційної системи зв'язку за умов, коли рівень інформаційного сигналу знаходиться на рівні чи нижче рівня шуму. При цьому, доведена можливість шляхом кореляції прийнятого та опорного сигналів вилучення корисного сигналу із суміші інформаційних двійкових сигналів та білого гаусівського шуму.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аджемов С.С., Соколова М.В., Урядников Ю.Ф., Штыркин В.В. Сверхширокополосная связь — результат развития технологий широкополосного доступа. — Электросвязь, 2006. — №2. — с. 18-23.
2. Вишневыский В.М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета // Электросвязь. — 2000. №10.
3. Соколова М.В. *Сверхширокополосная беспроводная связь: история и перспективы развития*. - Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. -2008. -С-50-55.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд.: Пер. с англ.-М.: Изд. дом «Вильямс», 2003. — 1104 с.
5. Р. Морелос-Сарагоса. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М.: Техносфера, 2005. - 320 с.
6. Massey J.L. Coding and Modulation in Digital Communications. // Proc. Int. Zurich Seminar on Dig. Comm., pp. E2(1)-E2(4), Zurich, Switzerland, 1974.
7. Lazurenko V.A. (2020). Security Improvement Techniques for mobile applications of Industrial Internet of Things [Text] / V.A. Lazurenko, A.A. Serkov, K.A. Trubchaninova, A.E. Horiushkina // *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. Vol. 20, No. 5, P. 145-149. URL: [http://paper.ijcsns.org/07\\_book/202005/20200519.pdf](http://paper.ijcsns.org/07_book/202005/20200519.pdf).
8. Serkov O.A. (2019). On the issue of solving the problem of electromagnetic compatibility of the wireless telecommunication Systems / O. A. Serkov, G. I. Churyumov // *Applied Radio Electronics*. — Kharkiv: KHNURE, 2017. — Vol. 16 № 3, 4. — P. 117-121.
9. Serkov A. (2017). Noise-like signals in wireless information transmission systems / A. Serkov, V. Breslavets, M. Tolkachov, G. Churyumov, Issam Saad // *Advanced Information Systems*. — 2017. — Vol. 1, №2 — P. 33 – 39, available at: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.06>.
10. Serkov A. (2019). Method of wireless transmission of digital information on the basis of ultra-wide signals [Text] / A. Serkov, K. Trubchaninova, M. Mezitis // *Advanced Information Systems*. - 2019. — Vol.3, No.4. pp. 33-38, available at: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.4.04>.
11. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. — М.: Госэнергоиздат, 1956. — 151 с.
12. Slepian D. Some comment on the Detection of Gaussian Signals in Gaussian Noise // *JRE Transactions on Information Theory*, 1958. - № 2 — p. 65-68.
13. Спосіб передачі інформації надширококутними імпульсними сигналами: патент на винахід UA 123519 Україна: МПК Н04В 1/02 (2006.01), МПК Н04В 1/69 (2011.01) МПК Н04В 7/00 / Б.О. Лазуренко, В.Я. Певнев, О.А. Серков, В.А. Ткаченко, В.С. Харченко; заявка № а 2019 05980; подана 30.05.2019; опубл. 14.04.2021, Бюл. № 15.
14. Спосіб передачі інформації надширококутними імпульсними сигналами в транспортних засобах: патент на корисну модель UA 140210 U Україна: МПК Н04В 1/12 (2006.01) / С.В. Панченко, О.А. Серков, К.А. Трубочанінова, М.С. Курцев, Б.О. Лазуренко; заявка № u 2019 07640; подана 08.07.2019; опубл. 10.02.2020, Бюл. № 3.
15. Спосіб прийому цифрових двійкових сигналів в умовах шуму: патент України на корисну модель № 145319 U МПК Н04В 1/06 / С. В. Панченко, О.А. Серков, К.А. Трубочанінова, А.С. Горюшкіна, Б.О. Лазуренко; заявка № u 2020 04847 подана 29.07.2020; опубл. 25.11.20, Бюл. № 22,
16. Рішення Федеральної комісії по зв'язку (FCC) США № FCC 02-48 від 14/02/2002 [Електронний ресурс]. — Режим доступу : [https://apps.fcc.gov/edocs\\_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf](https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf). — Дата доступу :31.12.2019.

Received (Надійшла) 31.05.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.08.2021

### Methods for ensuring electromagnetic compatibility of mobile telecommunication systems.

V. Knyazev, V. Kravchenko, B. Lazurenko, A. Serkov, K. Trubchaninova

**Abstract.** The **subject** is the process of ensuring electromagnetic compatibility in a self-organized mobile wireless network by using ultra-wideband signals with a high information capacity. The **goal** is to develop recommendations for the implementation of wireless mobile communication when transmitting discrete messages over a communication channel with additive Gaussian noise. The **objective** is to ensure stable and reliable operation of the ultra-wideband communication system. **Methods** used: analytical modeling methods and the theory of potential stability. The following results were obtained. A criterion for ensuring the requirements of electromagnetic compatibility of mobile telecommunication systems has been developed. On the basis of the theory of potential noise immunity, the possibility of stable and interference-free operation of a telecommunication wireless system in conditions when the level of the information signal and noise have the same value is shown. The possibility of extracting a transmitted information signal from a mixture of noise and a useful signal by correlating the received and reference signals has been proven. **Conclusions.** It is shown that the use of ultra-wideband signal technology allows for wireless cover information transmission with low radiation power. Moreover, the large base of the signal allows to ensure stable interference-free operation of the telecommunication communication system in conditions when the level of the information signal is at or below the noise level. At the same time, the possibility of extracting a useful signal from a mixture of information binary signals with white Gaussian noise has been proved.

**Keywords:** mobile communications; noise immunity; signal base; emc criterion; correlation.

L. Sakovych<sup>1</sup>, S. Gnatiuk<sup>2</sup>, S. Voloshko<sup>3</sup>, Yu. Miroshnichenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Special Communication and Information Protection of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky”, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Institute of Modeling Problems in energy named after H.YE. Pukhova, Kyiv, Ukraine <sup>3</sup>National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## RESEARCH OF CONDITIONAL DIAGNOSTIC ALGORITHMS MANY SOURCE OBJECTS

**Abstract.** Without regard to the swift increase of reliability of element base of modern special communication means actual is a question of providing of their a fitness is to repair, of value of indexes of that regulated by leading documents. Considerable time of permanent repair of special communication means occupies the search of defective elements, that is why important enough improvement of the diagnostic providing. It is arrived at by the use of effective algorithms of searching activity of masters that abbreviate the necessary amount of verifications of the damaged apparatus. It is set that to 30 percent of refuses of special communication means conditioned by disrepairs their sources of secondary power supply, that behave to the class of many source objects. In the article with drawing on modern accomplishments of technical diagnostics and metrology, that was not taken into account before, research possible variants of construction of conditional diagnostic algorithms. Also research their indexes of quality depending on the structural features of object of diagnosticating and the brought results over of comparison. The terms of repressing choice of algorithms of search of defects are set on the criterion of a minimum of mean time of renewal, the order of decision of this task is formalized. The got results it is expedient to draw on during development of the diagnostic providing of perspective special communication means, and also and at the improvement of existing. Thus, taken off part of limitations that is used in the known methodologies, that allows to promote efficiency scientifically reasonable practically implemented recommendations in relation to time of proceeding in special communication means at the refuse of their sources of secondary power supply.

**Keywords:** diagnostic algorithm, many source object, average recovery time.

### Introduction

Modern software-controlled means of special communication (MSC) are constantly complicated in the direction of automation of technological operations, quality assurance and continuity of communication, which leads to an increase in the number of elements, which in turn does not contribute to the required values of reliability.

Therefore, the problem of the effectiveness of the diagnostic process during the current repair of the MSC is quite relevant and requires a continuous solution and improvement as technology develops.

That is, we have a contradiction between the improvement of the MSC, increasing the number of elements and the need to ensure the directive values of reliability indicators. Its removal in modern conditions is possible by improving the diagnostic support, namely the introduction of effective algorithms for finding defects during the current repair of the SC [1].

Analysis of SC failures shows that up to 30% falls on the failure of secondary power sources [2-5].

It is established that the subsystem of power supply of MSC belongs to the class of multi-output objects (MO), which differ in the peculiarities of the process of recovery [6, 7].

Therefore, there is a need to study the most effective algorithms for diagnosing MO, which minimize the average recovery time.

### Basic material and results

Known methods of developing diagnostic software MO [1, 2, 7, 8] do not take into account the results of

recent research in the field of technical diagnostics [9] and metrology [10, 11]. To increase the accuracy of estimating the value of the average recovery time, it is proposed to take into account the probability of correct diagnosis and metrological reliability of the measured equipment (ME).

The value of these indicators in the known methods is limited: that is, the probability of correct evaluation of the test result at the time of diagnosis is equal to one, and the ME is valid in advance.

These provisions do not correspond to the real conditions of recovery of the MSC in the field [2, 5, 7]. These shortcomings are eliminated in this article, the purpose of which is to study the conditional algorithms for diagnosing (CAD) MO, taking into account the probable indicators of the defect search process – the probability of correct diagnosis and metrological reliability of ME in contrast to known studies and publications.

In the general case, the ME (power supply subsystem, generator equipment or allocation of communication channels in radio relay stations, tropospheric communication stations or multi-channel hardware field communication) can be represented in the form of Fig. 1 (for power supply subsystems, it is a transformer with secondary windings, rectifiers, filters, voltage stabilizers), where  $M$  is the number of outputs (in the general case – ME units),  $n$  is the number of typical replacement elements (TRE) that are part of spare parts with depth to which it is necessary to determine the defect.

According to the recommendations [1], the general CAD MO takes the form of Fig. 2.

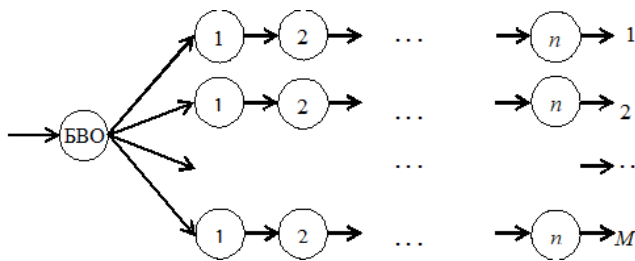


Fig. 1. Block diagram of a multi-output object

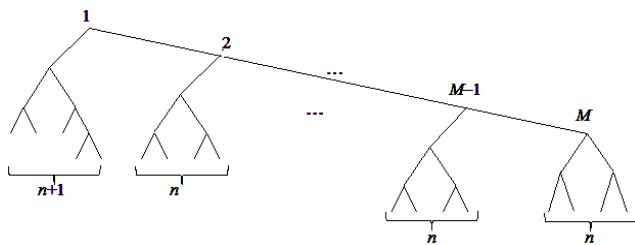


Fig. 2. General conditional algorithm for diagnosing a multi-output object

The total number of inspections for this CAD is equal to

$$K_{\Sigma} = (n+1)(1 + \log_2(n+1)) + n \left( (M-1) + \sum_L^{M-1} i + (M-1)\log_2 n \right) = (n+1)(1 + \log_2(n+1)) + n((M-1)(1 + \log_2 n) + 0,5(M-1)M - 1),$$

and the average number of inspections when searching for a defect is

$$K = \frac{K_{\Sigma}}{1 + nM} = \frac{K_{\Sigma}}{L},$$

where L is the total number of MO elements.

In that case, the average recovery time of the MO

$$T_1 = \frac{K t_b}{p^k P},$$

where  $t_b$  – the average measurement time when performing the test;  $p$  – the probability of correct evaluation of the measurement result;  $P$  – metrological reliability of the FTA.

In Fig. 3 shows the dependences of the average recovery time of the MO on the number of blocks ( $M \leftrightarrow$ ) and the time of measurement ( $t_b$ ), provided that  $p = 0,9997$  and  $P = 0,98$  [10, 11], and  $L = 256$ .

Consider the second option for diagnosis: measuring the output signals when searching for a faulty unit and diagnosing it with CAD minimal form:

$$K_6 = \frac{(M-1)(M+2)}{2M}; K_e = \log_2 \frac{L}{M}; T_2 = \left( \frac{K_6}{p^{K_6}} + \frac{K_e}{p^{K_e}} \right) \frac{t_b}{P},$$

where  $K_6$  is the average number of checks when searching for a faulty unit;  $K_e$  – the average number of checks when searching for a faulty replacement element. We believe that in both cases use one ME. Unlike the first option, it is a two-stage diagnostic process.

In Fig. 4 shows the dependences  $T_2(M, t_b)$ , under the same conditions as  $T_1$ .

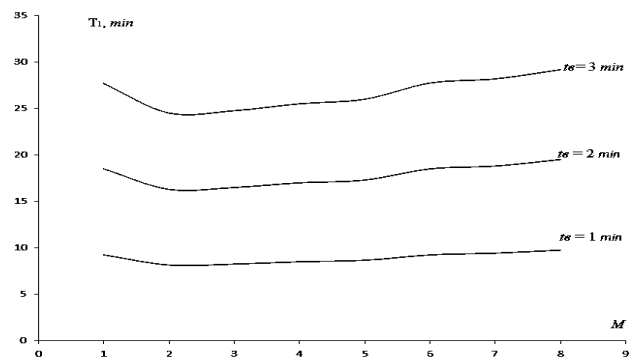


Fig. 3. The dependences of the average recovery time of a multi-output object on the number of blocks and the execution time of the scan

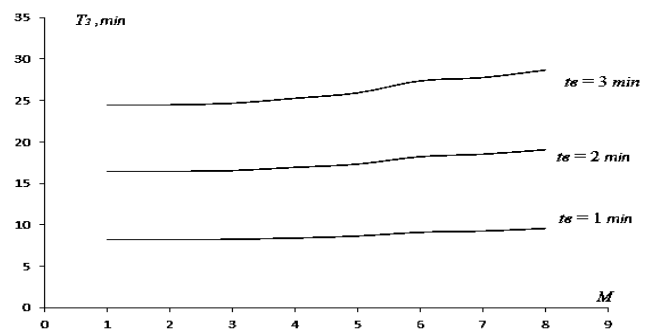


Fig. 4. Dependencies of the average recovery time in the two-stage process of diagnosing a multi-output object

Comparison of Fig. 3 and Fig. 4, shows that this option is not better than the previous one, but with increasing value of M we have a slower increase in recovery time.

We consider further the two-stage process of diagnosing: search of the faulty block by procedure of trial replacements, and TRE as before. The procedure of trial replacements is very simple and does not require ME, but only a serviceable set of TRE as part of spare parts, or the presence of a serviceable set of MSC. The average recovery time

$$T_3 = K_6 t_3 + \frac{K_e t_b}{p^{K_e} P},$$

where  $t_3$  is the average test execution time of the unit.

Dependencies  $T_3(M, t_b)$  at  $t_3 = 1 \text{ min}$  are shown in Fig. 5.

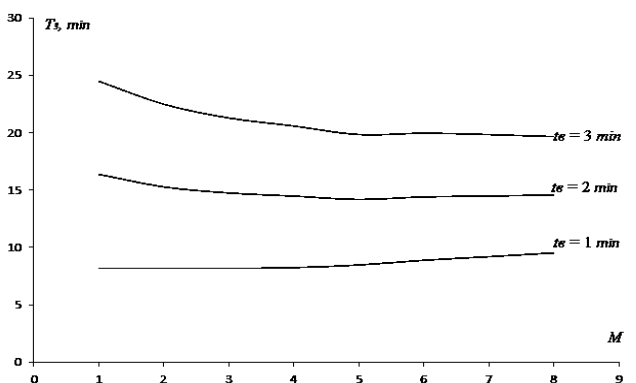


Fig. 5. Dependencies of the average recovery time when using trial replacement procedures at the first stage of diagnosis

The advantage of this procedure is performed if

$$T_2 - T_3 = K_6 \left( \frac{t_B}{p^{K_6 P}} - t_3 \right) > 0,$$

that is

$$\frac{t_B}{t_3} > p^{K_6 P}$$

This inequality is always satisfied because  $t_B > t_3$  and  $p^{K_6 P} < 1$ .

When restoring the MSC in the field in the hardware of the hardware at the first stage of diagnosis, it is advisable to use a group search for defects, when specialists simultaneously perform measurements of parameter values. In this case, the maximum number of block checks is equal to

$$K_m = \left[ \frac{M - 1}{\mu} \right],$$

where  $[A]$  means rounding the number  $A$  to an integer value (for example,  $[2,1] = 3$ ). And the average value of the number of inspections in a group search for defects

$$K_r = \frac{\mu K_m (K_m + 1)}{2M},$$

Then the total recovery time of the MSC is equal to

$$T_4 = \frac{t_B}{P} \left( \frac{K_r}{p^{K_r}} + \frac{K_e}{p^{K_e}} \right).$$

The dependences of  $T_4(M, t_B)$  for  $\mu = 2$  are shown in Fig. 6.

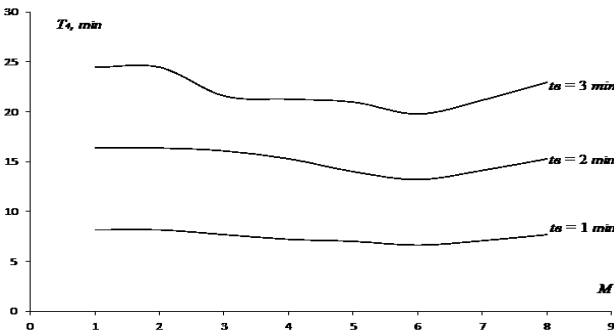


Fig. 6. Dependencies of the average recovery time of the product during the implementation at the first stage of group search of the faulty unit

A comparison of the last two diagnosis options shows that

$$T_3 - T_4 = K_6 t_3 - \frac{K_r t_B}{p^{K_r P}} > 0,$$

Provided

$$\frac{K_6}{K_r} p^{K_r P} > \frac{t_B}{t_3}.$$

Since  $p^{K_r P} < 1$ , the number of specialists is  $\mu > 1$  and  $K_r < K_6$  provided  $\frac{M-1}{M+1} < \mu$ , which is always executed, then  $T_3 > T_4$ .

If there are no fuses, you can use the procedure to disconnect the connectors or remove the units to search for a short circuit in the power supply circuits. Then from the beginning it is advisable to turn off 0.5 M and check the power supply, then 0.25 M and so on until the

overload unit is installed. The number of simultaneously switched off units at each step of the test is halved, ie the total number of outages is equal to

$$N = \frac{M}{2} + \frac{M}{4} + \dots + \frac{M}{M} = M \sum_{i=1}^M 2^{-i} = M(1 - 2^{-M}).$$

In this case, the total time of diagnosis is

$$T_5 = M(1 - 2^{-M}) t_p \log_2 M + t_B K_e / p^{K_e P},$$

where  $t_p$  is the time to disconnect the ( $t_p < t_B$ ) connectors.

Dependences of  $T_5(M, t_B)$  at  $t_p = 1$  are given in Fig. 7.

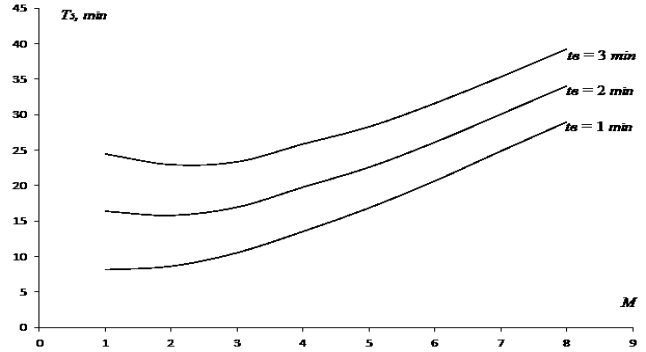


Fig. 7. Dependences of the average time of diagnosing the product with the disconnection of the blocks from power supply

Since in the two-stage search for defects (first block, then TRE) always increases the value of  $M$  in the product, the search time of the block increases, and the search time TRE decreases, the function  $T_1(M)$  has a minimum value that should be considered when designing MSC. This value can be found by an algorithmic increase in the value of  $M$  from one to  $L$ .

A comparison of options shows that always  $T_5 < T_3$ , because

$$\frac{2M \log_2 M}{(M - 1)(M + 2)} < \frac{t_3}{t_p} < 1.$$

In the best case, if the facility has indicators at all outputs of the power supply unit or the ability to check the voltage with built-in FTA, their readings are checked taking into account the probability of the preferred choice, ie starting with the least reliable. In this case, the total time of diagnosis is

$$T_6 = \frac{M(t_n + t_i)}{p_1^M P_1} + \frac{t_B K_e}{p_2^{K_e} P_2}$$

if you use built-in and external ME with different values of  $p$  and  $P$ , where  $t_n$  is the switching time of the built-in device,  $t_i$  is the time of evaluation of its indicators.

The dependences of  $T_6(M, t_B)$ , at  $t_n + t_i = 1$  are shown in Fig. 8 and also have a minimum value for a number of blocks.

A comparison with the previous diagnostic procedure shows that  $T_6 < T_5$  when the condition is met

$$\frac{1}{p_1^M P_1 (1 - 2^{-M}) \log_2 M} < \frac{t_p}{t_n + t_i}.$$

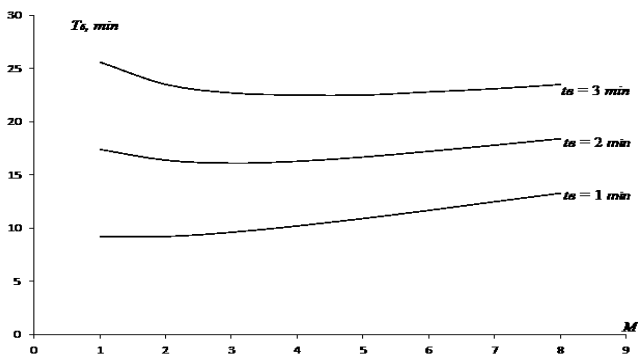


Fig. 8. Dependences of the average time of diagnosing the product on the number of blocks when using built-in and external measuring instruments

Thus, the article considers practically feasible options for diagnosing BVI and obtained a quantitative estimate of the average time of diagnosis.

The average recovery time in all cases is equal to

$$T_{bi} = T_i + t_y \leq T_{вдоп},$$

where  $i = \overleftarrow{1, 6}$  is a variant of diagnosis,  $t_y$  – the average troubleshooting time,  $T_{вдоп}$  – allowable recovery time according to guidelines.

### Conclusions

Analysis of the results shows that there is no universal diagnostic procedure.

The functional dependences of the average time of diagnosis on the design of the product and time indicators of operations, which differ from those known taking into account the quality of metrological support of the current repair of the GCC, are obtained.

In the future, it is advisable to use the results in the method of choosing the algorithm for diagnosing BVI depending on their design and recovery conditions.

### REFERENCES

1. Ксєнз С.П. Диагностика и ремонтнопригодность радиоэлектронных средств. Москва: Радио и связь, 1989. 248 с.
2. Сакович Л.Н., Бобро Р.А. Ремонт вторичных источников электропитания техники связи. Зв'язок. Київ, 2005, № 7, С. 56-60.
3. Желнов А.І., Романенко В.П. Электроживлення систем зв'язку. Київ: ІСЗЗІ НТУУ "КПІ", 2016. 84 с.
4. Липкань О. Военная техника связи. Київ: УНІАН, 2000, Вип. 28 (116), С. 9-10.
5. Сакович Л.М., Желнов А.І., Романенко В.П., Богдан Я.Ю. Ремонт в польових умовах підсистем електроживлення засобів спеціального зв'язку. XI науково-практична конференція "Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в операції Об'єднаних сил" 8-9 листопада 2018 р. Київ: ВІПІ, 2018, С. 201-202.
6. Сакович Л.Н., Курченко О.А. Диагностирование многовыходных аналоговых объектов. Зв'язок. Київ, 2001, № 3, С. 52-54.
7. Богдан Я.Ю., Сакович Л.М. Особливості відновлення працездатності підсистеми електроживлення засобів спеціального зв'язку. Науково-практична конференція "Актуальні питання застосування спеціальних інформаційно-телекомунікаційних систем" 23-24 червня 2020 р. Київ: ІСЗЗІ КПІ ім. Сікорського, 2020, С. 154.
8. Сакович Л.Н., Мервинский А.И. Функциональное диагностирование многовыходных объектов. Зв'язок. Київ, 2003, № 1, С. 60-61.
9. Ксєнз С.П., Полтаржицкий М.И., Алексеев С.П., Минеев В.В. Борьба с диагностическими ошибками при техническом обслуживании и ремонте систем управления связи и навигации. Санкт-Петербург: ВАС, 2010. 240 с.
10. Кононов В.Б., Водолажко О.В., Коваль О.В., Науменко А.М., Кондратова І.І. Основи експлуатації засобів вимірювальної техніки військового призначення в умовах проведення АТО. Харків: ХНУПС, 2017. 288 с.
11. Yevhen Ryzhov, Lev Sakovych, Petro Vankovych, Maksym Yakovlev, Yuriy Nastishin. Optimization of requirements for measuring instruments at metrological service of communication tools. *Measurement. Journal of the International Measurement Confederation*, Vol. 123 (July 2018) P. 19-25. DOI: <https://doi.org/10/1016/j.measurement.2018.03.055>.

Received (Надійшла) 22.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

### Дослідження умовних алгоритмів діагностування багатовихідних об'єктів

Л. М. Сакович, С. Є. Гнатюк, С. В. Волошко, Ю. В. Мирошниченко

**Анотація.** Незважаючи на стрімке зростання надійності елементної бази сучасних засобів спеціального зв'язку актуальним є питання забезпечення їх ремонтнопридатності, значення показників якої регламентується керівними документами. Значний час поточного ремонту засобів спеціального зв'язку займає пошук несправних елементів, тому досить важливе удосконалення діагностичного забезпечення. Це досягається використанням ефективних алгоритмів пошукової діяльності майстрів, які скорочують необхідну кількість перевірок пошкодженої апаратури. Встановлено, що до 30 відсотків відмов засобів спеціального зв'язку обумовлено несправностями їх джерела вторинного електроживлення, які відносяться до класу багатовихідних об'єктів. В статті із використанням сучасних досягнень технічної діагностики і метрології, які не враховувались раніше, досліджені можливі варіанти побудови умовних алгоритмів діагностування. Також досліджені їх показники якості залежно від конструктивних особливостей об'єкта діагностування і приведені результати порівняння. Встановлено умови переважного вибору алгоритмів пошуку дефектів за критерієм мінімуму середнього часу відновлення, формалізовано порядок рішення цього завдання. Отримані результати доцільно використовувати під час розробки діагностичного забезпечення перспективних засобів спеціального зв'язку, а також і при удосконаленні існуючих. При цьому знята частина обмежень, які використовуються у відомих методиках, що дозволяє підвищити ефективність науково обґрунтованих практично реалізуємих рекомендацій щодо часу відновлення засобів спеціального зв'язку при відмові їх джерел вторинного електроживлення.

**Ключові слова:** алгоритм діагностування, багатовихідний об'єкт, середній час відновлення.

В. М. Ткачов, А. А. Коваленко, Т. Г. Фесенко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖНОГО АЛГОРИТМУ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ ПІДВИЩЕНОЇ ЖИВУЧОСТІ НА МОБІЛЬНІЙ ПЛАТФОРМІ НА ЕТАПІ ЇХ ПРОЕКТУВАННЯ

**Анотація.** В статті розглянуто особливості вибору мережного алгоритму та сформульовано задачу його оптимізації при проектуванні комп'ютерної мережі на мобільній платформі шляхом розробки критерію живучості зазначеного класу комп'ютерних мереж. **Метою** статті є розробка критерію живучості комп'ютерної мережі на мобільній платформі для подальшого його використання при проектуванні зазначеного класу мереж з метою забезпечення належного рівня живучості мережі. Отримані **результати** дозволяють продовжити розвиток методики оцінки живучості комп'ютерних мереж на мобільній платформі в умовах деструктивного зовнішнього впливу за необхідності перебудови її топології; вирішувати оптимізаційні задачі мережного алгоритму функціонування комп'ютерних мереж на мобільній платформі на етапі їх синтезу. Дослідження дозволяють зробити **висновки**, що запропонований критерій може бути використаний на етапах проектування живучості комп'ютерних мереж на мобільній платформі, які характеризуються підвищеною живучістю та функціонують в умовах постійної перебудови схем маршрутизації даних, у тому числі за рахунок перебудови топології. Сформульовано напрями подальшої роботи, зокрема в частині проведення дослідження щодо введення в комп'ютерні мережі на мобільній платформі структурну збитковість з визначенням вузлів, які під час виконання мережею основної функції, стають уразливими, тобто захист яких необхідно підвищувати.

**Ключові слова:** живучість, комп'ютерна мережа на мобільній платформі, оптимізація, критерій.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Протягом останніх п'яти років технологічні передумови породили велику кількість модифікацій комп'ютерних мереж, вузлами якої виступають рухомі об'єкти, як то безпілотні літальні апарати, дрони, боти тощо [1-2].

Однак, на відміну від більшості технологічних рішень розважально-побутового характеру в означеній сфері, існують галузі застосування зазначеного класу мереж, пов'язані з пожежною безпекою, технологічними процесами на виробництві, військово-справою тощо [3-4].

Розробка методів забезпечення живучості комп'ютерних мереж на мобільній платформі в умовах деструктивного зовнішнього впливу та використання методики оцінки живучості на всіх етапах функціонування мережі є актуальною задачею [5-6]. Ця задача органічно входить до сімейства задач підвищення живучості технічних систем, над вирішенням яких працює ряд відомих наукових шкіл [7-8].

Однак при проектуванні реальних комп'ютерних мереж на мобільній платформі виникає прикладна задача, що полягає у розробці механізму врахування показників живучості як компонентів мережі, так і алгоритмічного забезпечення в цілому. Такі мережі також прийнято називати комп'ютерними мережами підвищеної живучості на мобільній мережі або високомобільними комп'ютерними мережами [9] Мірилом зазначеного показника є критерій живучості комп'ютерних мереж на мобільній платформі (КММП). З метою формалізації даного критерію, розглянемо такі сутності: множину координат  $X, Y, Z$ , координати вузлів комп'ютерної мережі, значення інтенсивностей потоків даних між ними, вимоги до якості та надійності передачі даних, інформація про

затрати на створення вузлів та каналів передачі даних між ними. Основним обмеженням є сумарне значення затрат створення КММП.

В такому випадку необхідно визначити оптимальне число, координати розміщення, ємність і продуктивність мережних вузлів, топологію та траєкторію її зміни, динаміку значення пропускної здатності каналів передачі даних.

Рішення задачі в загальному вигляді вимагає розробки складного математичного апарату, а отримання числових результатів – великого обсягу обчислень. Виходячи з динамічності руху вузлів в КММП та зміни показників, які входять в розрахунковий апарат, результат обчислень може буде отриманий для ситуації, яка докорінно змінилася в КММП з часом. Тому, в задачах проектування КММП вводяться додаткові обмеження, що дозволяє отримати максимально приближене значення для визначення наступного кроку у функціонуванні КММП (або траєкторії її поведінки у разі використання у якості вузлів інтелектуальних мобільних об'єктів).

Таким чином, актуальною є науково-прикладна проблема забезпечення заданого рівня живучості комп'ютерної мережі на мобільній платформі на етапі їх проектування шляхом розробки відповідного критерію.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існує ряд методів визначення показників живучості КММП, які можна покласти у якості підґрунтя для формулювання критерію живучості.

Наприклад, у роботі [10] розглянуто метод прямого перебору станів елементів та каналів високомобільних мереж. Він заснований на теорії Бернуллі для розрахунку ймовірності перебування мережі в стані, коли відмовила деяка кількість елементів або зв'язок між елементами порушено. Розрахо-

вані ймовірності пропонуються авторами у якості фундаменту для розробки математичного апарату для формулювання критерію живучості.

Недоліком даного методу є його низька практична застосовність: невиправдане витрачання часу на формування бінарного представлення станів вузлів та каналів між ними. Час обчислення станів каналів передачі даних вище, чим вузлів, але ці підходи рівні в оцінках однієї і тієї ж мережі. Область практичного застосування залежить від кількості вузлів мережі. При великих мережах з кількістю вузлів більше 50, ефективність методу падає [10]. Також важливо зазначити, що, власне, компоненти КММП, в зв'язку з обмеженим енергетичним запасом ходу, не можуть виконувати енергоємні розрахунки «на борту», тоді як час передачі службових даних для проведення розрахунків на платформі з більшим енергетичним ходом може спричинити надмірну циркуляцію службових даних, чим зменшити пропускну здатність КММП в умовах динаміки руху вузлів.

Також відома робота [11], у якій автори приводять у якості рішення проблеми алгоритм оптимального розміщення комунікаційно-керуючих центрів розглянутого класу мереж. Роль обчислювального центру для розрахунку критерію живучості та прийняття рішень для зміни траєкторії поведінки мережі виконує окремих вузол мережі – обчислювач.

Основним недоліком є зменшення гнучкості мережі та концентрація обчислювальних процедур на окремих вузлах, які необхідно резервувати. Однак відхід від децентралізованої схеми організації роботи КММП зменшує її живучість в умовах зовнішнього впливу на роботу мережі (наприклад, електромагнітне ураження тощо). Вихід з ладу вузла, який несе функції обчислювача траєкторії поведінки мережі може призвести до катастрофічної руйнації КММП.

**Метою статті** є розробка критерію живучості комп'ютерної мережі на мобільній платформі для подальшого його використання при проектуванні зазначеного класу мереж з метою забезпечення належного рівня живучості мережі.

### Основна частина

Задачу проектування КММП [12] з урахуванням додаткових вимог по її живучості можна вирішити в два етапи. Спочатку одним із методів [12] визначається її структура, що відповідає вимогам передачі поточкових даних з заданою якістю. Потім визначаються необхідні параметри. Елементи структури КММП, отримані на першому етапі, мають відповідати показнику живучості не нижче мінімального рівня. Таким чином, мінімальним рівнем живучості КММП є такий рівень, при досягненні якого є можливим досягнення живучості КММП за рахунок зміни її структури. Сюди можна віднести додання резервних каналів передачі даних (низькошвидкісні канали для відділених вузлів), підвищення ступеню захисту вузлів від деструктивного впливу (шляхом деактивації деяких допоміжних функцій), обрання мережного алгоритму (маршрутизації),

зміна стратегії передачі службових даних, зміна в алгоритмах функціонування вузлів мережі тощо.

Мінімальний рівень для різних топологій КММП може бути неоднаковим. Наприклад, для розгалужених мереж така вимога до живучості, як ймовірність справності вузла  $p(v)_{\min} = 0,5$ . Припустимо,  $p(v) \geq p(v)_{\min}$ . Тоді критерій живучості можна визначити шляхом оптимізації мережного алгоритму  $Z$  функціонування КММП (і, при отриманні  $Z_{opt}$ , визначення ймовірності  $p(E_j)$ ). Класична методика розробки подібного роду критеріїв [13] передбачає застосування комплексу заходів, однак, в межах введених обмежень в даній роботі, буде застосовано оптимістичний підхід, побудований на оптимізації стратегічної функції, якою задається траєкторія функціонування КММП.

**Оптимізація мережного алгоритму функціонування КММП.** Мережний алгоритм функціонування КММП – це сукупність обмежень по вибору маршрутів передачі даних між вузлами. Відповідно, необхідно оптимізувати допустимі ранг шляхів передачі даних та кількість стовпів адресної таблиці при розрахунку маршрутизації.

Збільшення кількості шляхів передачі даних між вузлами реєстрації інформації в мережі та шлюзами підвищує ймовірність  $p(E)$ , але, згідно [10], відомо, що основне значення мають маршрути, що не перетинаються, які складають множини  $\hat{M}$ . Збільшення допустимого рангу  $z_1$  маршруту та допустимої кількості  $z_2$  стовпів адресної таблиці маршрутизації призводить до збільшення кількості маршрутів опорної множини  $\hat{M}$ . Кількість маршрутів *route* може бути дуже великою, але зростання  $p(E)$  обмежене зверху і, починаючи з деякого асимптотичного значення, збільшення кількості шляхів є недоцільним.

Отже, далі необхідно виконати оптимізацію обмежень  $z_1$  та  $z_2$ . Нехай  $Z_i$  – мережний алгоритм, при якому значення  $z_1$  та  $z_2$  приймають  $i$ -ту пару значень ( $i = 0, 1, \dots, N$ ). Індексом  $i$  задається складність мережного алгоритму. Нехай  $Z_i$  є складнішим за алгоритм  $Z_k$ , якщо  $i > k$ . При цьому хоча б одне значення  $z_1, z_2 \in Z_i$  більше  $z_1, z_2 \in Z_k$ . Тоді: алгоритм  $Z_0$  дозволяє передачу даних тільки по одному маршруту в мережі;  $Z_1$  – по одному з маршрутів  $\mu \in \hat{M}$ ;  $Z_N$  – відсутні обмеження на кількість маршрутів. Таким чином, для оптимізації мережного алгоритму необхідно виконати оцінку залежності відношення (1) від укладення мережного алгоритму:

$$\delta(Z) = \frac{1 - p(E(Z_1))}{1 - p(E(Z_i))}, \quad (1)$$

де  $p(E(Z_i))$  – ймовірність справності підсистеми двох вузлів, між якими відбувається обмін даними, при мережному алгоритмі  $Z_i$  («вузол реєстрації інформації» – «шлюз мережі») (далі - підсистема).



Для спрощення представлення підсистеми між двома вузлами, пропонується модель (рис. 1).

На рис. 1 чарунки  $s_1, s_2, s_3, s_4$  – перетини підсистеми відносно її полюсів, їх ранг та ймовірність справності  $p(s_i)$ , які від укладення мережного алгоритму не залежать. Перетин  $s_5$  відповідає магістральній ділянці мережі, тому на  $p(s_5)$  впливає складність мережного алгоритму. Для зображеної моделі на рис. 1:

$$p(E(Z)) \approx p_s p(s_5(Z_i)) \quad (2)$$

де  $p_s = \prod_{i=1}^4 p(s_i)$ .

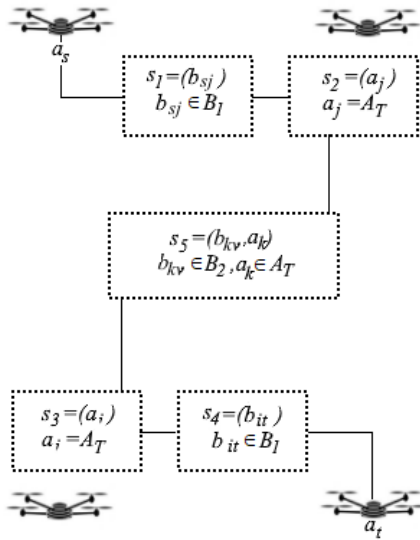


Рис. 1. Спрощена модель підсистеми між двома вузлами

При  $i > 1$  за умови  $p(E(Z_i)) \geq p(E(Z_1))$ , тому  $\delta(Z) \geq 1$ . Підставляючи (2) в (1), додаючи до чисельника і вираховуючи з нього знаменник, після перетворення вигляд рівняння є таким:

$$\delta(Z) = 1 + p_s \frac{p(s_5^i) - p(s_5^1)}{1 - p(E(Z_i))}. \quad (3)$$

Верхній індекс відповідає мережному алгоритму.

При великих ймовірностях справності вузлів мережі і доволі складного мережного алгоритму  $p(s_5^i) \approx 1$ . При мережному алгоритмі  $Z_1$ , підсистема містить лише шляхи  $\mu \in \hat{M}$  (їх кількість  $route = r_a$ , де  $r_a$  – мінімальний з рангів вузлів). Тоді:

$$p(s_5^i) = 1 - \sum_{k=1}^{r_a} (1 - p(e_k')) \quad (4)$$

Подія  $e_k'$  означає справність маршруту  $\mu_k \in \hat{M}$ , що містить магістральні вузли підсистеми в мережі. З урахуванням наведеного, верхня межа співвідношення (1):

$$\delta^+(Z) = 1 + \frac{p_s}{1 - p_s} \prod_{i=1}^4 p(1 - p(e_k')) \quad (5)$$

Область можливих значень  $\delta(Z)$  при заданих  $p(v)$  і динаміці підвищення рангу полюсів  $r_a$  показана на рис. 2. Далі необхідно визначити залежність  $\delta(Z)$  від укладення мережного алгоритму за умови  $p(s_5^i) < 1$  і будь-якому  $i \leq N$ .

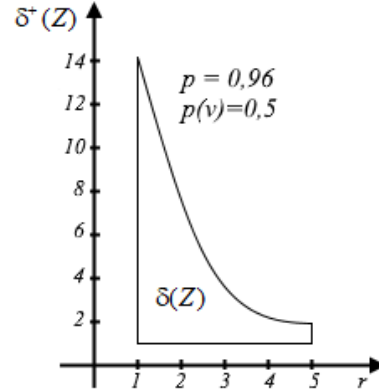


Рис. 2. Область ймовірного підвищення живучості за рахунок укладення мережного алгоритму

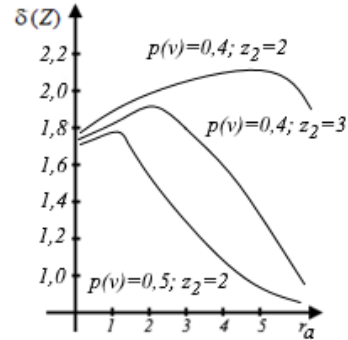


Рис. 3. Залежність співвідношення  $\delta(Z)$  від зміни рангів полюсів підсистеми  $r_a$

Ускладнення мережного алгоритму при малому ранзі полюсів підсистеми викликає значне підвищення чисельника у (3) у порівнянні з підвищенням її знаменника, що призводить до зростання  $\delta(Z)$ . Але з підвищенням ранга полюсів підсистеми, як видно з (3),  $p(E(Z_i)) \rightarrow p_s$ . Відповідно, знаменник (3) прямує до постійної величини  $1 - p_s$ . У той же час, зі зростанням рангу полюсів, чисельник (3) прямує до нуля, бо  $p(s_5^1) \rightarrow p(s_5^i)$ . Звідси виходить, що при заданих  $p(v)$  існує максимум функції  $\delta(Z) = f(r_a)$ .

Застосовуючи графоаналітичний метод і при заданій структурі КММП, далі необхідно визначити оптимальний мережний алгоритм  $Z_{opt}$ .

На рис. 3 зображені залежності від мінімального із рангів полюсів  $r_a$  при різних  $p(v)$  та  $z_2$ . Графіки побудовано за результатами розрахунків (3).

Достовірність отриманих даних за (3) підтверджується графіками, отриманими в середовищі GS (рис. 4). Криві 2-5 показують залежність  $p(E(Z_i))$  від  $p(v)$  при  $z_2 = 1, 2, 3, 4$  відповідно. При цьому  $z_1 = 5$ . Крива 1 характеризує залежність  $p(E(Z_N))$  для тієї ж мережі без обмежень. З рис. 3 видно, що  $p(E(Z_4)) \approx p(E(Z_N))$ . Залежність  $\delta(Z)$  від  $z_1$  при фіксованому  $z_2$  –аналогічна.

При оптимізованому мережному алгоритмі вибору маршрутів передачі даних суттєво знижується функціональна збитковість КММП без зниження її живучості. Так, в табл. 1 приведено кількість ребер, які входять в маршрути передачі даних в підсистемі «вузол реєстрації інформації - шлюз» при різних мережних алгоритмах.

Кожне ребро має містити деяку кількість каналів для передачі потоків даних даної підсистеми. Як видно з табл. 1, при мережному алгоритмі  $Z_5$  сумарна кількість каналів підсистеми має бути в два рази вище, ніж при мережному алгоритмі  $Z_4$ . Але відповідно до зображених на рис. 4 графіків, алго-

ритми  $Z_i$  при  $i > 4$  фактично не призводять до підвищення значення ймовірності  $p(E)$ .

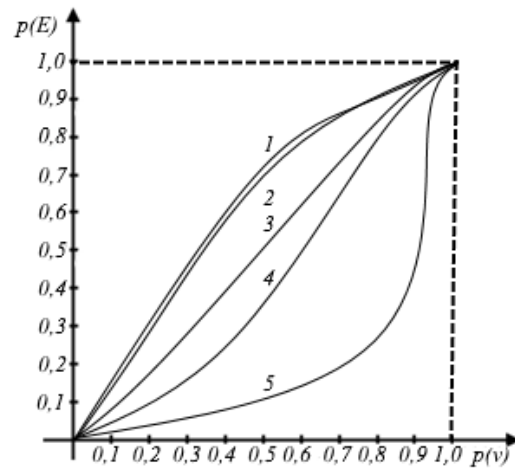


Рис. 4. Залежність живучості КММП від живучості її вузлів при  $z_1 = 5$  і різних  $z_2$ : крива 1 – обмежень в мережі немає; крива 2 –  $z_2 = 4$ ; крива 3 –  $z_2 = 3$ ; крива 4 –  $z_2 = 2$ ; крива 5 –  $z_2 = 1$

Таблиця 1 – Кількість ребер, що входять в підсистему підсистеми «вузол реєстрації інформації - шлюз» при різних мережних алгоритмах

Мережний алгоритм $z_i = \{z_1, z_2\}$	Кількість ребер, що входять в підсистему підсистеми «вузол реєстрації інформації - шлюз»						
	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$D_6$	$D_7$
$Z_0 = (3,1)$	4	3	4	3	4	3	3
$Z_1 = (4,1)$	10	10	10	9	10	6	8
$Z_2 = (3,2)$	14	17	10	12	11	7	9
$Z_3 = (4,3)$	19	21	16	15	16	14	13
$Z_4 = (5,4)$	24	24	23	18	24	24	19
$Z_5 = (6,5)$	38	41	35	29	36	38	29

**Загальний вигляд критерію живучості.** Враховуючи проведену оптимізацію та виходячи з того, що живучість окремо взятого вузла КММП можна оцінити як ймовірність його виживання, то критерій живучості КММП має вигляд інтегральний вид:

$$K_Z = \sum_{\forall \Gamma_i \in \Gamma} \Gamma_i - \sum_{\forall \Gamma_i, \Gamma_j \in C_1^2, i \neq j} \prod \Gamma_i \Gamma_j + \dots + (-1)^{\Gamma} \prod_{i=1}^{\Gamma} \Gamma_i \quad (6)$$

де  $\Gamma_i$  – фактори, що впливають на живучість КММП.

Однак дана варіація критерію обмежена умовами, що були поставлені на початку роботи. Тому, вводячи нові параметри, знімаючи обмеження, критерій ускладняється пропорційна складності введених умов забезпечення живучості. Згідно попередніх досліджень [5] та розрахунків [6], під час проектування КММП, заздалегідь може бути відомо, що наслідки дії деяких факторів на КММП або окремі вузли, з урахуванням заходів по забезпеченню безпеки, – несуттєві у порівнянні з іншими. Тоді такі фактори відносяться до розряду другорядних і з розрахунку критерію живучості (6) виключаються.

Розрахунок критерію (6) може бути диференційований також по окремим групам, наприклад по факторам зносу елементної бази (проблема «старіння») або зовнішнього ураження вузлів тощо.

Розрахунки, згідно математичного апарату, запропонованого вище, показують, що для доволі розгалужених мереж оптимізовані значення допустимого значення повторних прийомів  $z_{1opt} \leq 6$  і допустимої кількості стовпців адресної таблиці маршрутизації  $z_{2opt} \leq 5$ , що у розрахунку критерію живучості відповідно складає 0,3 та 0,25.

### Висновки

За результатами проведенної роботи з оптимізації мережного алгоритму функціонування комп'ютерних мереж підвищеної живучості на мобільній платформі на етапі їх проектування успішно вирішена наукова задача розробки критерію живучості комп'ютерної мережі та встановлена доцільність його застосування при проектуванні зазначеного класу мереж з метою забезпечення належного рівня живучості мережі. Зокрема досягнуто такі основні результати:

- сформульована науково-прикладна задача розробки критерію живучості комп'ютерної мережі на мобільній платформі;

- отримала подальший розвиток методика оцінки живучості комп'ютерних мереж в умовах деструктивного зовнішнього впливу за необхідності перебудови її топології;

- вирішено оптимізаційну задачу мережного алгоритму функціонування комп'ютерних мереж підвищеної живучості на мобільній платформі на етапі їх синтезу.

Запропонований підхід може бути застосованим на етапах проектування вказаного в роботі кла-

су комп'ютерних мереж з кількістю учасників більше 50 та розгалуженою мапою маршрутів передачі даних між вузлами реєстрації інформації та шлюзу мережі.

У якості подальшої роботи за даним напрямком пропонується виконати дослідження щодо введення в КММП структурну збитковість з визначенням вузлів, які під час виконання мережею основної функції, стають уразливими, тобто захист яких необхідно підвищувати [14]. Отримані теоретичні результати при визначенні критерію живучості пропонується перевести у площину практичної їх застосовності.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Srivastava A., Prakash J. Future FANET with application and enabling techniques: Anatomization and sustainability issues // *Computer Science Review*. – 2021. – Т. 39. – С. 100359.
2. Chriki A. FANET: Communication, mobility models and security issues // *Computer Networks*. – 2019. – Т. 163, 106877.
3. Orozco-Lugo A. G. et al. Monitoring of water quality in a shrimp farm using a FANET // *Internet of Things*. – 2020. – С. 100170.
4. Khan I. U. et al. Smart IoT control-based nature inspired energy efficient routing protocol for flying ad hoc network (FANET) // *IEEE Access*. – 2020. – Т. 8. – С. 56371-56378.
5. Churyumov, G., Tokarev, V., Tkachov, V., & Partyka, S. (2018, August). Scenario of interaction of the mobile technical objects in the process of transmission of data streams in conditions of impacting the powerful electromagnetic field. In 2018 IEEE second international conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP) (pp. 183-186). IEEE.
6. Створення науково-методичних основ забезпечення живучості мережевих систем обміну інформацією в умовах зовнішнього впливу потужного НВЧ-випромінення [Текст]: вик. НДР (заключний звіт) / Харківський національний університет радіоелектроніки; керівн. Чурюмов Г.І., вик. Токарєв В.В., Ткачов В.М. – Х.: 2018. – № держреєстрації 018U000832.
7. А.Г. Додонов, Д.В. Ландэ. Живучесть информационных систем. – К.: Наук. думка, 2011. – 256 с.
8. Распределенная архитектура как средство повышения надежности и живучести бортовых информационно-управляющих систем / Н. П. Бородавка, Б. В. Остроумов, Н. Ф. Сидоренко, В. В. Тарасенко, В. С. Харченко, С. Я. Яценко // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2012. – № 6 (58). – С. 139-147
9. Метод забезпечення живучості високомобільної комп'ютерної мережі / В. М. Ткачов [та ін.] // *Сучасні інформаційні системи = Advanced Information Systems*. – 2021. – Т. 5, № 2. – С. 159-165.
10. Bondarenko L. A. et al. Оценка живучести иерархических телекоммуникационных сетей военного назначения // *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*. – 2018. – Т. 31. – №. 1. – С. 61-67.
11. Кусакина М. С., Нетес В. А. Проблемы обеспечения надежности программно-конфигурируемых сетей // *Телекоммуникации и информационные технологии*. – 2019. – Т. 6. – №. 1. – С. 39-43.
12. Ross K. W. *Multiservice loss models for broadband telecommunication networks*. – Springer Science & Business Media, 2012.
13. Проектирование и эксплуатация сетей передачи дискретных сообщений / [ Архипов М. Н., Захаров Г. П., Малиновский С. Т., Яновский Г. Г.]. – М.: Радио и связь, 1988. – 360 с.
14. Tokariev V. Implementation of combined method in constructing a trajectory for structure reconfiguration of a computer system with reconstructible structure and programmable logic // *Selected Papers of the XIX Int. Scientific and Practical Conf. "Information Technologies and Security"(ITS 2019), Ukraine*. – 2019. – С. 71-81.

Received (Надійшла) 24.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.08.2021

### Optimization of the network algorithm for the operation of increased survivability computer networks on a mobile platform at the stage of their design

Vitalii Tkachov, Andriy Kovalenko, Tetiana Fesenko

**Abstract.** The article discusses the features of choosing a network algorithm and formulates the problem of its optimization when designing a computer network on a mobile platform by developing a survivability criterion for the specified class of computer networks. The **purpose** of the article is to develop a criterion for the survivability of a computer network on a mobile platform for its further use in the design of the specified class of networks in order to ensure an appropriate level of network survivability. The results obtained make it possible to continue the development of the methodology for assessing the survivability of computer networks on a mobile platform under conditions of destructive external influences when it is necessary to rebuild its topology; to solve optimization problems of the network algorithm for the functioning of computer networks on a mobile platform at the stage of their synthesis. The studies allow us to **conclude** that the proposed criterion can be used at the stages of designing the survivability of computer networks on a mobile platform, characterized by increased survivability and functioning under conditions of constant restructuring of data routing schemes, including by restructuring the topology. Directions for further work are formulated, in particular, in terms of conducting a study on introducing structural unprofitability into computer networks on a mobile platform with the identification of nodes that, when the network performs its main function, become vulnerable, that is, the protection of which must be increased.

**Keywords:** survivability, computer network on a mobile platform, optimization, criterion

## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Альошин С. П.	113	Захарченко І. В.	18	Ольшанська Т. І.	74
Аросланкін О. О.	37	Зима О. Є.	113	Павленко М. А.	60
Бабкін Ю. В.	46	Зозуля Л. А.	123	Панова О. В.	126
Бажак О. В.	24	Зозуля С. В.	123	Пащенко Р. Е.	8
Баканов К. Л.	46	Іохов О. Ю.	130	Піскачов О. І.	99
Бараненко Р.	89	Каліновський Д. О.	60	Піскачова І. В.	99
Бідюк П. І.	64	Капітон А.	89	Піскун С. В.	46
Блиндюк В. С.	56	Каплун Є. О.	130	Постніков Є. Є.	37
Бондаренко К. О.	82	Клепко А. В.	4	Походун В.	78
Бульба С. С.	92	Князєв В. В.	134	Рудоман Н. В.	64
Вайвала Є.Ю.	69	Коваленко А. А.	143	Сакович Л. М.	139
Верховський В. В.	18	Ковальова А. В.	118	Серков О. А.	134
Волк М. О.	74	Конох К. М.	50	Сімаєв А. С.	103
Волошкіна О. С.	118	Кравченко В. І.	134	Скакаліна О. В.	108
Волошко С. В.	139	Кужелович В. І.	33	Скородєлов В. В.	56
Гавриленко В. В.	64	Кучук Н. Г.	92	Табуненко В. О.	33
Гайтан О. М.	113	Лазуренко Б. О.	134	Тарасов Р. В.	18
Гейко Г. В.	56	Лютенко В. Є.	42	Тищенко Д.	89
Глива В. А.	123	Мажара І. П.	28	Ткаленко О. В.	74
Гнатюк С. Є.	139	Макогон О. А.	46	Ткаченко В. П.	99
Головко Г.	78	Малюк В. Г.	130	Ткачов В. М.	143
Гора М. В.	74	Марценяк О. П.	33	Трубчанінова К. А.	134
Григоренко А. М.	50	Марюшко М. В.	8	Урум Н. С.	24
Гуць Є. В.	64	Маслов А. В.	96	Федунов В. М.	24
Дакі О. А.	24	Мастюх В. О.	42	Фесенко Т. Г.	143
Демчук В. Г.	74	Масягін В. І.	50	Філоненко А. М.	92
Деркач Т. М.	96, 103	Матвєєва І. В.	123	Хахалкіна О. А.	50
Дзюбан О. С.	96	Мирошніченко Ю. В.	139	Хвостенко В. С.	82
Дмитренко Т. А.	96, 103	Мосійчук М. В.	46	Цьопа Н. В.	69
Дяченко О.	89	Москаленко В. І.	46	Шапіро Г. В.	37
Євсєєв С. П.	82	Нестеренко С. В.	4	Шефер О. В.	4
Єрмоленко Д. А.	4	Носков В. І.	56	Шиман А. П.	92

Наукове видання

## СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Збірник наукових праць

Випуск 3 (65)

Відповідальна за випуск *К. С. Нестеренко*

Технічний редактор *Т. В. Уварова*

Коректор *О. В. Морозова*

Комп'ютерна верстка *Н. Г. Кучук, І. Ю. Петровська*

Оформлення обкладинки *І. В. Ільїна*

Свідectво про державну реєстрацію КВ № 19512-93/2ПР від 16.11.2012 р.

Підписано до друку 15.09.2021. Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 18,5. Тираж 120 прим. Зам. 915-21

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)