



Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут"

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"



# Сучасні Інформаційні Системи

# Advanced Information Systems

Sučasni informacijni sistemi

Том 5, № 4

Volume 5, No. 4

Щоквартальний  
науково-технічний журнал

Quarterly  
scientific and technical journal

Заснований у березні 2017 року

Founded in March 2017

У журналі публікуються результати досліджень з експлуатації та розробки сучасних інформаційних систем у різних проблемних галузях. Журнал призначений для наукових працівників, викладачів, докторантів, аспірантів, а також студентів старших курсів відповідних спеціальностей.

The journal publishes the research study from the usage and development of advanced information systems in various problem areas. The journal is intended for researchers, lecturers, doctoral students, postgraduate students, and for senior students of the corresponding specialties.

**Засновник і видавець:**

Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут"

**Founder and publisher:**

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Кафедра "Обчислювальна техніка та програмування",  
вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків, Україна

Department of Computer Science and Programming,  
61002, Ukraine, Kharkiv, Kyrpychova str., 2

**Телефон:**

+38 (057) 707-61-65

**Phone:**

+38 (057) 707-61-65

**E-mail редколегії:**

kuchuk56@ukr.net

**E-mail of the editorial board:**

kuchuk56@ukr.net

**Інформаційний сайт:**

<http://ais.khpi.edu.ua>

**Information site:**

<http://ais.khpi.edu.ua>

*Затверджений до друку Вченою Радою Національного технічного університету  
"Харківський політехнічний інститут" (протокол від 26 листопада 2021 року № 11).*

*Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 22522-12422Р від 13.01.2017 р.*

*Включений до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук" до категорії Б – наказом Міністерства освіти і науки України від 07.05.2019 № 612 (додаток 7, п. 33)*

Харків • 2021

## Редакційна колегія

### Головний редактор:

СОКОЛ Євген Іванович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*).

### Заступник головного редактора:

СЕМЕНОВ Сергій Геннадійович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*).

### Члени редакційної колегії:

БАЙРАМОВ Азад Агахар огли  
(*д-р фіз.-мат. наук, проф., Баку, Азербайджан*);

БЛАУНШТЕЙН Натан Шаєвич  
(*д-р фіз.-мат. наук, проф., Беер-Шева, Ізраїль*);

ГНАТЮК Сергій Олександрович  
(*д-р техн. наук, доц., Київ, Україна*);

ЗАЙЦЕВА Єлена  
(*д-р наук, проф., Жиліна, Словаччина*);

КАРПІНСЬКИЙ Микола Петрович  
(*д-р техн. наук, проф., Бельсько-Бяла, Польща*);

КОВАЛЕНКО Андрій Анатолійович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

КОСТЕНКО Павло Юрійович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

КУЧУК Георгій Анатолійович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

ЛИТВИН Василь Володимирович  
(*д-р техн. наук, проф., Львів, Україна*);

ЛУКІН Володимир Васильович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

МАМУЗІЧ Ілля  
(*д-р техн. наук, проф., Загреб, Хорватія*);

МИГУЩЕНКО Руслан Павлович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

МОХАММЕД Амін Саліх  
(*д-р наук, доц., Ербиль, Ірак*);

ОСТАПОВ Сергій Едуардович  
(*д-р фіз.-мат. наук, проф., Чернівці, Україна*);

ПОВОРОЗНЮК Анатолій Іванович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

РАСКІН Лев Григорович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

САРАВАНА Балаї Баласубраманіан  
(*PhD, доц., Ербиль, Ірак*);

СЕРКОВ Олександр Анатолійович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

СМІРНОВ Олексій Анатолійович  
(*д-р техн. наук, проф., Кропивницький, Україна*);

СТАНКУНАС Йонас  
(*д-р техн. наук, проф., Вільнюс, Литва*);

СТЕЦЬКО Юрій  
(*канд. фіз.-мат. наук, Тампа, Флоріда, США*);

СУЧКОВ Григорій Михайлович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

УШЕНКО Юрій Олександрович  
(*д-р фіз.-мат. наук, проф., Чернівці, Україна*);

ФІЛАТОВА Ганна Євгенівна  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

ХАРЧЕНКО Вячеслав Сергійович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);

ШВАЧИЧ Геннадій Григорович  
(*д-р техн. наук, проф., Дніпро, Україна*);

ШИШАЦЬКИЙ Андрій Володимирович  
(*канд. техн. наук, Київ, Україна*);

### Відповідальний секретар:

ПОДОРЖНЯК Андрій Олексійович  
(*канд. техн. наук, доц., Харків, Україна*).

### Технічний секретар:

ГРЕБЕНЮК Дарина Сергіївна  
(*магістр комп. інж., Харків, Україна*).

## Editorial board

### Editor-in-Chief:

Yevgen SOKOL  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*).

### Associate editor:

Serhii SEMENOV  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*).

### Editorial board members:

Azad Agalar oğlu BAYRAMOV  
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Baku, Azerbaijan*);

Nathan BLAUNSTEIN  
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Beer Sheva, Israel*);

Sergiy GNATYUK  
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Kyiv, Ukraine*);

Elena ZAITSEVA  
(*Dr. (Comp. Eng.), Prof., Zilina, Slovakia*);

Mikolay KARPINSKI  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Bielsko-Biala, Poland*);

Andriy KOVALENKO  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

Pavlo KOSTENKO  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

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

Vasyl LYTVYN  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Lviv, Ukraine*);

Volodymyr LUKIN  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

Ilya MAMUZIC  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Zagreb, Croatia*);

Ruslan MYGUSHCHENKO  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

Amin Salih MOHAMMED  
(*Dr. (Comp. Eng.), Ass. Prof., Erbil, Iraq*);

Serhii OSTAPOV  
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Chernivtsi, Ukraine*);

Anatoliy POVOROZNYUK  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

Lev RASKIN  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

Balasubramanian Balaji SARAVANA  
(*PhD (Comp. Eng.), Ass. Prof., Erbil, Iraq*);

Aleksandr SERKOV  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

Alexey SMIRNOV  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kropyvnytskyi, Ukraine*);

Jonas STONKUNAS  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Vilnius, Lithuania*);

Yuri STETSKO  
(*PhD (Ph-Math.), Tampa, Florida, USA*);

Hryhorii SUCHKOV  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

Yuri USHENKO  
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Chernivtsi, Ukraine*);

Hanna FILATOVA  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

Viacheslav KHARCHENKO  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);

Hennadii SHVACHICH  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Dnipro, Ukraine*);

Andrii SHYSHATSKYI  
(*PhD (Tech.), Kyiv, Ukraine*).

### Responsible secretary:

Andrii PODOROZHNIAC  
(*PhD (Tech.), Ass. Prof., Kharkiv, Ukraine*).

### Technical secretary:

Daryna HREBENIUK  
(*MSD of Comp. Eng., Kharkiv, Ukraine*).

## З М І С Т

### ПРОБЛЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

- Гавриленко С. Ю., Горносталь О. А.*  
Розробка методу ідентифікації стану  
комп'ютерних систем на основі  
бегтінг-класифікаторів ..... 5
- Гороховатський В. О., Власенко Н. В.*  
Редукція опису зображення у складі множини  
дескрипторів на основі метричного критерію  
інформативності ..... 10

### МЕТОДИ СИНТЕЗУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

- Барабаш О. В., Бандурка О. І.,  
Шпурик В. В., Свинчук О. В.*  
Інформаційна система аналізу геоданих  
для відслідковування змін рослинності ..... 17
- Волошин Д. Г., Бречко В. О., Семенов С. Г.*  
Метод композиції маршруту безпілотного  
літального апарату у просторі ..... 26
- Порошин С. М., Усик В. В., Біліков І. С.*  
Методи формування оптимальних акустичних умов  
передачі мовного контенту в приміщеннях  
малих обсягів ..... 34
- Чистов В. І., Захарченко І. В.,  
Павленко В. М., Павленко М. А.*  
Метод вибору стратегії поведінки клітинного  
автомата при рішенні завдання пошуку  
групою рухових об'єктів (eng.) ..... 42

### ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

- Григоренко І. В., Кондрашов С. І.,  
Григоренко С. М.*  
Розробка та дослідження системи контролю  
параметрів середовища штучної екосистеми  
апаратом fuzzy-logic ..... 49
- Крепич С. Я., Снівак І. Я.*  
Удосконалення алгоритму SVD для підвищення  
ефективності рекомендаційних систем (eng.) ..... 55
- Лебедєв О. Г., Лебедєв В. О.*  
Методика аналізу ризиків  
в інформаційних системах ..... 60
- Майданик О. О., Мелешко Є. В.,  
Шимко С. В.*  
Дослідження впливу конструкції та налаштувань  
квадрокоптера на якість його роботи  
при моніторингу наземних об'єктів (eng.) ..... 64
- Раскін Л. Г., Сухомлин Л. В.,  
Сагайдачний Д. О., Корсун Р. О.*  
Аналіз багатопоточних марківських систем (eng.) ..... 70
- Смірнова Т. В., Буравченко К. О.,  
Кравченко С. С., Горбов В. О.,  
Смірнов О. А.*  
Хмарна система підтримки прийняття рішень  
технологічного процесу відновлення  
поверхонь конструкцій і деталей машин ..... 79

## TABLE OF CONTENTS

### PROBLEMS OF IDENTIFICATION IN INFORMATION SYSTEMS

- Svitlana Gavrylenko, Oleksii Hornostal*  
Development of a method for identification  
of the state of computer systems based  
on bagging classifiers (ukr) ..... 5
- Volodymyr Gorokhovatskyi, Nataliia Vlasenko*  
The image description reduction in the set  
of descriptors on informativeness  
metric criteria base (ukr) ..... 10

### METHODS OF INFORMATION SYSTEMS SYNTHESIS

- Oleg Barabash, Olena Bandurka,  
Vadim Shpuryk, Olha Svynchuk*  
Information system of analysis of geo data  
for tracking changes of vegetation (ukr) ..... 17
- Denys Voloshyn, Veronika Brechko, Serhii Semenov*  
Method of an unmanned aerial vehicle  
composition route in space (ukr) ..... 26
- Sergei Poroshin, Victoriya Usik, Ihor Bielikov*  
The methods for the formation of optimal acoustic  
conditions for the transmission of speech content  
in small rooms (ukr) ..... 34
- Valerii Chystov, Iryna Zakharchenko,  
Vladislava Pavlenko, Maksim Pavlenko*  
A method for choosing a strategy for the behavior  
of a cellular automaton when solving the problem  
of finding targets by a group of moving objects ..... 42

### INFORMATION SYSTEMS RESEARCH

- Ihor Hryhorenko, Serhii Kondrashov,  
Svitlana Hryhorenko*  
Development and research of the parameters control  
system of the artificial ecosystem environment  
by the fuzzy-logic system (ukr) ..... 49
- Svitlana Krepych, Iryna Spivak*  
Improvement of SVD algorithm to increase the efficiency  
of recommendation systems ..... 55
- Oleh Lebediev, Valentyn Lebediev*  
Analysis of risks methodology  
in information systems (ukr) ..... 60
- Oleksandr Maidanyk, Yelyzaveta Meleshko,  
Serhii Shymko*  
Study of influence of quadrocopter design and settings  
on quality of its work during monitoring  
of ground objects ..... 64
- Lev Raskin, Larysa Sukhomlyn,  
Dmytro Sagaidachny, Roman Korsun*  
Analysis of multi-threaded Markov systems ..... 70
- Tetiana Smirnova, Kostiantyn Buravchenko,  
Serhii Kravchenko, Vitalii Horbov,  
Oleksii Smirnov*  
Cloud system for decision supporting of technological  
process of restoration of surfaces of structures  
and machine parts (ukr) ..... 79

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ  
ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ**

<i>Дяченко В. О., Ляшенко О. С., Міхаль О. П., Уманець М. С.</i> Інтелектуальні підходи до організації видаленого контролю якості зберігання зернових продуктів (eng.) .....	96
<i>Чалий С. Ф., Лециньський В. О.</i> Ієрархічна модель каузальних зв'язків для деталізації пояснень в інтелектуальних системах (eng.) .....	103

**МЕТОДИ ЗАХИСТУ  
ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

<i>Юдін О. Ю., Сидоренко В. М., Гнатюк С. О., Верхоєць О. С.</i> Модель розрахунку кількісного критерію оцінювання захищеності інформаційно-телекомунікаційних систем критичної інфраструктури держави .....	109
--	-----

**ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ  
ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

<i>Дубницький В. Ю., Кобилін А. М., Кобилін О. А., Кушнерук Ю. І.</i> EXCEL – орієнтована процедура для обчислення значень спеціальних функцій з інтервальним аргументом, заданим в гіперболічній формі .....	116
<i>Канцєдал В. М., Могила А. А.</i> Особливості цілепокладання при забезпеченні інформаційної стійкості режимів зондування оглядової РЛС в процесі їх радіоелектронного придушення .....	124
<i>Сергєєв О. С., Кривошапка А. І., Ісаков О. В., Лисенко В. О., Москаленко В. І., Бурдін С. В.</i> Математичне та фізичне підґрунтя для розроблення симулятора витягування і буксування колісних та гусеничних машин (eng.) .....	135
<b>Алфавітний покажчик</b> .....	140

**INTELLIGENT  
INFORMATION SYSTEMS**

<i>Vladyslav Diachenko, Oleksii Liashenko, Oleg Mikhal, Mariia Umanets</i> Intelligent approaches to organizing remote quality control of storage of GRAIN products .....	96
<i>Serhii Chalyi, Volodymyr Leshchynskyi</i> Hierarchical model of causal relationships to detail explanations in intelligent systems .....	103

**METHODS OF INFORMATION  
SYSTEMS PROTECTION**

<i>Oleksii Yudin, Viktoriia Sydorenko, Sergiy Gnatyuk, Oleksii Verkhovets</i> Model of the quantitative criterion calculation for security assessment of the information and telecommunications systems in the critical infrastructure of the state (ukr) .....	109
---	-----

**APPLIED PROBLEMS  
OF INFORMATION SYSTEMS OPERATION**

<i>Valeriy Dubnitskiy, Anatolii Kobylin, Oleg Kobylin, Yuriy Kushneruk</i> EXCEL-orientated procedure for calculating the values of special functions with interval argument assigned on the hyperbolic form (ukr) .....	116
<i>Valery Kantsedal, Anatoly Mogyla</i> Peculiarities of purpose in providing the information stability of surveillance radar sensing modes in the process of their radio electronic suppression (ukr) .....	124
<i>Alexander Serhieiev, Andriy Krivoshapka, Oleksandr Isakov, Vyacheslav Lysenko, Viktor Moskalenko, Sergiy Burdin</i> Mathematical and physical basis for developing a simulator for towing and pulling of wheeled and tracked machines .....	135
<b>Alphabetical index</b> .....	140

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

**Географія статей цього номера**

Київ (Kyiv)  
Кременчук (Kremenchuk)  
Кропивницький (Kropyvnytskyi)  
Тернопіль (Ternopil)  
Харків (Kharkiv)



Україна  
Ukraine

## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Бандурка О. І. (Olena Bandurka) .....	17	Лебедев В. О. (Valentyn Lebediev) .....	60
Барабаш О. В. (Oleg Barabash) .....	17	Лебедев О. Г. (Oleh Lebediev) .....	60
Беліков І. С. (Ihor Bielikov) .....	34	Лещинський В. О. (Volodymyr Leshchynskyi) ..	103
Бречко В. О. (Veronika Brechko) .....	26	Лисенко В. О. (Vyacheslav Lysenko) .....	135
Буравченко К. О. (Kostiantyn Buravchenko) .....	79	Ляшенко О. С. (Oleksii Liashenko) .....	96
Бурдін С. В. (Sergiy Burdin) .....	135	Майданик О. О. (Oleksandr Maidanyk) .....	64
Верховець О. С. (Oleksii Verkhovets) .....	109	Мелешко Є. В. (Yelyzaveta Meleshko) .....	64
Власенко Н. В. (Nataliia Vlasenko) .....	10	Міхаль О. П. (Oleg Mikhal) .....	96
Волошин Д. Г. (Denys Voloshyn) .....	26	Могила А. А. (Anatoly Mogyla) .....	124
Гавриленко С. Ю. (Svitlana Gavrylenko) .....	5	Москаленко В. І. (Viktor Moskalenko) .....	135
Гнатюк С. О. (Sergiy Gnatyuk) .....	109	Павленко В. М. (Vladislava Pavlenko) .....	42
Горбов В. О. (Vitalii Horbov) .....	79	Павленко М. А. (Maksim Pavlenko) .....	42
Горносталь О. А. (Oleksii Hornostal) .....	5	Порошин С. М. (Sergei Poroshin) .....	34
Гороховатський В. О. (Volodymyr Gorokhovatskyi) .....	10	Раскін Л. Г. (Lev Raskin) .....	70
Григоренко І. В. (Ihor Hryhorenko) .....	49	Сагайдачний Д. О. (Dmytro Sagaidachny) .....	70
Григоренко С. М. (Svitlana Hryhorenko) .....	49	Свинчук О. В. (Olha Svynchuk) .....	17
Дубницький В. Ю. (Valeriy Dubnitskiy) .....	116	Семенов С. Г. (Serhii Semenov) .....	26
Дяченко В. О. (Vladyslav Diachenko) .....	96	Сергеев О. С. (Alexander Serhieiev) .....	135
Захарченко І. В. (Iryna Zakharchenko) .....	42	Сидоренко В. М. (Viktoriiia Sydorenko) .....	109
Ісаков О. В. (Oleksandr Isakov) .....	135	Смірнов О. А. (Oleksii Smirnov) .....	79
Канцедал В. М. (Valery Kantsedal) .....	124	Смірнова Т. В. (Tetiana Smirnova) .....	79
Кобилін А. М. (Anatolii Kobylin) .....	116	Співак І. Я. (Iryna Spivak) .....	55
Кобилін О. А. (Oleg Kobylin) .....	116	Сухомлин Л. В. (Larysa Sukhomlyn) .....	70
Кондрашов С. І. (Serhii Kondrashov) .....	49	Уманець М. С. (Mariia Umanets) .....	96
Корсун Р. О. (Roman Korsun) .....	70	Усик В. В. (Victoriya Usik) .....	34
Кравченко С. С. (Serhii Kravchenko) .....	79	Чалий С. Ф. (Serhii Chalyi) .....	103
Крепич С. Я. (Svitlana Krepych) .....	55	Чистов В. І. (Valerii Chystov) .....	42
Кривошапка А. І. (Andriy Krivoshapka) .....	135	Шимко С. В. (Serhii Shymko) .....	64
Кушнерук Ю. І. (Yuriy Kushneruk) .....	116	Шпурик В. В. (Vadim Shpuryk) .....	17
		Юдін О. Ю. (Oleksii Yudin) .....	109

Наукове видання

Сучасні  
інформаційні системиAdvanced  
Information SystemsНауковий журнал  
Том 5, № 4Відповідальний за випуск *С. Г. Семенов*  
Технічний редактор *Д. С. Гребенюк*  
Комп'ютерна верстка *Н. Г. Кучук*

Свідчення про державну реєстрацію КВ № 22522-12422Р від 13.01.2017 р.

Підписано до друку 30.11.2021 Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 17,5. Тираж 100 прим. Зам. 1130-21

Адреса редакції: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"  
Кафедра ОТП, вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків, Україна, тел. 707-61-65Віддруковано 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. Широїнівців, 79в, к. 137, тел. (057) 778-60-34  
e-mail: [bookfabrik@mail.ua](mailto:bookfabrik@mail.ua)

## Problems of identification in information systems

УДК 004.732.056

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.01>

С. Ю. Гавриленко, О. А. Горносталь

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

### РОЗРОБКА МЕТОДУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАНУ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ БЕГГІНГ-КЛАСИФІКАТОРІВ

**Анотація.** Предметом дослідження є методи та засоби ідентифікації стану комп'ютерної системи. Метою статті є підвищення якості ідентифікації стану комп'ютерної системи за рахунок розробки методу на основі ансамблевих класифікаторів. **Завдання:** дослідити методи побудови беггінг класифікаторів на основі дерев рішень, виконати їх налаштування та розробити метод ідентифікації стану комп'ютерної системи. Використовуваними методами є: методи штучного інтелекту, машинного навчання, ансамблеві методи. Отримано такі результати: досліджено використання беггінг-класифікаторів на основі мета-алгоритмів: *Pasting Ensemble*, *Bootstrap Ensemble*, *Random Subspace Ensemble*, *Random Patches Ensemble* та *Random Forest* для ідентифікації стану КС, виконано оцінку їх точності. Виконано дослідження параметрів налаштування окремих дерев рішень та знайдено їх оптимальні значення, а саме: максимальну кількість ознак, що використовуються при побудові дерева; мінімальну кількість розгалужень при побудові дерева; мінімальну кількість листків та максимальну глибину дерева. Визначено оптимальну кількість дерев рішень ансамблю. Запропоновано метод ідентифікації стану комп'ютерної системи, який відрізняється від відомих вибором мета-алгоритму класифікації та підбором оптимальних параметрів його налаштування. Проведено оцінку точності розробленого методу ідентифікації стану комп'ютерної системи. Розроблений метод реалізований програмно і досліджений під час розв'язання задачі ідентифікації аномального стану функціонування комп'ютерної системи. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробці методу ідентифікації стану комп'ютерної системи за рахунок вибору мета-алгоритму класифікації та визначення оптимальних параметрів його налаштування.

**Ключові слова:** комп'ютерна система; події операційної системи; дерева рішень; ансамблеві методи; мета-алгоритм; беггінг; *Random Forest*.

#### Вступ

Сьогодні комп'ютерні системи (КС) використовуються практично у всіх галузях народного господарства. Використання таких складних технічних систем, з однієї сторони, усе більшою мірою стикається з проблемами забезпечення їх функціональної та інформаційної безпеки. Разом із тим з іншої сторони, рівень розвитку засобів ідентифікації та діагностування деструктивних змін режимів функціонування і внутрішніх характеристик таких систем на сьогодні не можуть гарантувати необхідний рівень захисту інформації. Саме тому дослідження методів та засобів ідентифікації стану комп'ютерних систем є актуальним завданням [1-3].

**Об'єктом дослідження** є процес ідентифікації стану комп'ютерної системи.

**Предметом дослідження** є методи ідентифікації стану комп'ютерної системи.

**Постановка проблеми та огляд наукових публікацій.** Комп'ютерна система характеризується великим обсягом показників її функціонування  $X = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$ . Одним із найбільш поширених методів ідентифікації стану комп'ютерної системи є методи машинного навчання, які призначені безпосередньо працювати з величезними масивами даних, а саме: класичні методи [1, 2], методи навчання з підкріпленням [3], неймережі і глибоке навчання [4], дерева рішень і ансамблеві методи [5, 6] та ін. Найбільш популярні алгоритми машинного навчання наведено в [7].

Оскільки показники функціонування КС є різнорідними, часто потребують затрат, пов'язаних з їх попередньою обробкою, то найбільш ефективним для вирішення завдання ідентифікації стану КС є використання дерев рішень (ДР) [8-9]. ДР використовують модель білого ящика, здатні працювати як з числовими, так і якісними даними, потребують малої підготовки даних, надають можливість переконатися в правильності моделі за допомогою статистичних тестів, тобто оцінити достовірність моделі. Разом із тим, точність моделей на основі ДР є не достатньою.

Одним з напрямків вдосконалення існуючих моделей є використання ансамблю класифікаторів на основі ДР. Найпопулярнішим видом ансамблів є сімейство беггінг-алгоритмів, що базується на ідеї поєднання незалежних слабких класифікаторів, які навчаються паралельно, використовуючи однаковий алгоритм навчання. В основі беггінгу лежить теорема Кондорсе :

$$\mu = \sum_{i=m}^N C_N^i p^i (1-p)^{N-i}$$

де  $\mu$  – вірогідність прийняття вірного рішення класифікатором,  $N$  – кількість дерев рішень,  $m$  – мінімальне значення необхідної більшості вірних рішень класифікаторів,  $p$  – вірогідність прийняття вірного рішення класифікатора,  $C_N^i$  – число поєднань із  $N$  по  $i$ .

Ефективність беггінгу досягається завдяки тому, що помилки базових алгоритмів, навчених на різних підвбірках, взаємно компенсуються при голосу-

ванні, а також за рахунок того, що об'єкти-викиди можуть не потрапляти до деяких навчальних підвбірок. Беггінг спрямований на зменшення розкиду (*variance*) – різниці між помилкою класифікації тренувальної та тестової вибірок. За якістю одержуваних прогнозів, ансамблі з декількох моделей часто перевершують інші методи [10-11].

У даній роботі досліджено використання беггінг-класифікаторів на основі мета-алгоритмів: *Pasting Ensemble*, *Bootstrap Ensemble*, *Random Subspace Ensemble* та *Random Patches Ensemble* для ідентифікації стану КС. Кожний із вищенаведених алгоритмів відрізняється алгоритмом формування вихідних даних класифікатора або підвбірок та вибором ознак [12].

Мета-алгоритм *Pasting* (склеювання) відомий як створення випадкових вибірок без заміни. Підвбірки містять усі вихідні ознаки  $X = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$ , формуються випадковим чином, є унікальними і не повторюються. При цьому близько 60% вихідних даних  $X$  використовують у якості вибірок для навчання, решта – тільки для тестування. Основним недоліком цього процесу є те, що кожна підвбірка не може бути повтореною і це створює проблему, коли набір даних недостатньо великий.

Мета-алгоритм *Bootstrapping* (початкового завантаження) є найпоширенішим. Підвбірки містять усі вихідні ознаки  $X = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$ , формуються випадковим чином і можуть повторюватися.

Відповідно до мета-алгоритму *Random Subspaces* (випадкових підпросторів) підвбірки створюються шляхом випадкового вибору ознак, а не випадковим вибором підвбірок, як це було зроблено раніше, при цьому близько 60% вихідних даних  $X$  використовують у якості підвбірок для навчання, решта – тільки для тестування.

Відповідно до мета-алгоритму *Random Patches* (випадкових патчів) підвбірки створюються шляхом випадкового вибору як ознак, так і спостережень (зразків) без повторювання. При створенні вибірок, зазвичай, використовується приблизно 40-60% зразків та атрибутів для навчання.

Відповідно до мета-алгоритму *Random Forest* (випадковий ліс) підвбірки створюються шляхом випадкового вибору як ознак, так і спостережень (зразків) з повторюванням. Випадкові ліси ефективні, коли набір даних має дуже великий розмір, містить викиди, пропущені значення або класи є незбалансованими. Недоліком алгоритму є схильність до пере-навчання, особливо за наявності великої кількості шумів у даних.

Жоден із вищенаведених мета-алгоритмів беггінгу не можна априорі вважати найкращим або досконалим. Підтвердження доцільності використання конкретного мета-алгоритму має бути перевірено і підтверджено експериментом. Крім того, на якість використання кожного із алгоритмів впливає процедура налаштування як самих дерев рішень, так і кількості дерев, які входять до ансамблю.

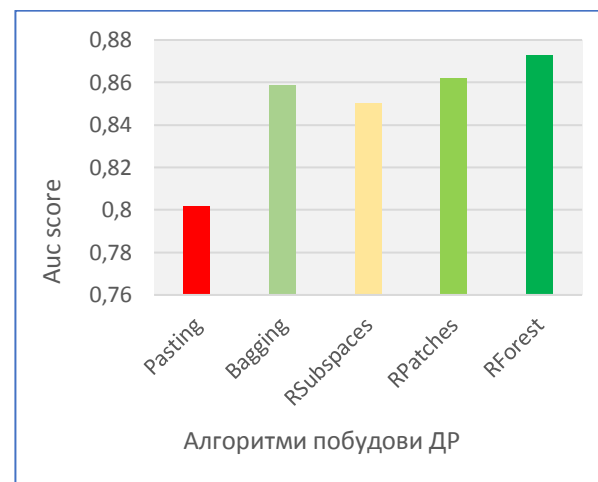
**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження та розробка методу ідентифікації стану

комп'ютерної системи на основі ансамблевих класифікаторів. Формальна постановка завдання може бути сформульована наступним чином. Нехай функціонування КС характеризується сукупністю її показників  $X = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$ , та існують розмічені пари об'єктів  $\{(x_i, y_i)_{i=1}^N$ , де  $x_i$  – показник стану КС, а  $y_i$  – мітка стану КС (нормальний або аномальний). Крім того, існує відображення  $f: X \rightarrow Y$  значення якої відомі лише на об'єктах кінцевої навчальної вибірки  $(X, Y) = \{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\}$ . Потрібно сформулювати мета-алгоритм  $f$ , який здатний класифікувати довільний об'єкт  $x \in X$  та налаштувати значення його параметрів  $w: F(f(w, x), y) \rightarrow opt$ .

### Розробка ансамблевого методу класифікації

В рамках дослідження розглянуто можливість використання беггінг-класифікаторів на основі мета-алгоритмів: *Pasting Ensemble*, *Bootstrap Ensemble*, *Random Subspace Ensemble* та *Random Patches Ensemble* для ідентифікації стану КС. У якості вихідних даних використано показники функціонування КС (завантаження центрального процесора, пам'яті, обсяг трафіку, кількість операцій зчитування/запису на диск, сигнатури вторгнень; статистичні дані аналізу системних подій (кількість операцій роботи із системним реєстром, файловою системою, кількість процесів та ін.).

Результати дослідження використання беггінг-класифікаторів наведено на рис. 1.



**Рис. 1.** Порівняння точності класифікації беггінг-мета-алгоритмів на навчальній вибірці за допомогою метрики *Auc\_score*

Отримано, що за умови стандартного налаштування найбільш якісним є класифікатор на основі алгоритму *Random Forest*, *ROC AUC* якого на навчальній вибірці складає 87%, при цьому точність на тестовій вибірці складає 82%.

Виконано дослідження параметрів налаштування ДР, які входять до ансамблю на основі мета-алгоритму *Random Forest*, а саме:

– максимальна кількість ознак, що використовуються при побудові дерева (*max features*).

- мінімальна кількість розгалужень при побудові дерева (*min sample split*).
- мінімальна кількість листків (*min sample leaf*).

- максимальна глибина дерева (*max depth*).

Результати дослідження налаштування на тестових вибірках наведено на рис. 2-5.

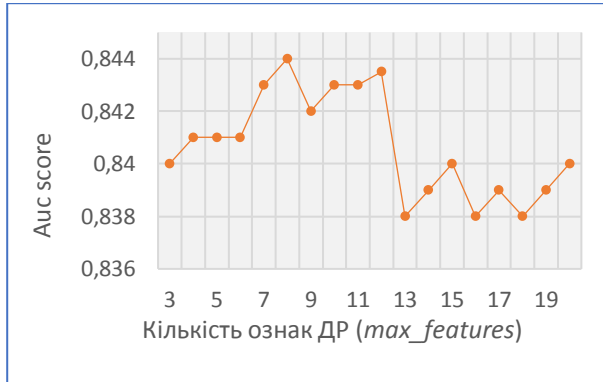
Отримано, що при наступних параметрах налаштування:

'*max\_depth*' від 9; '*max\_features*' від 7 до 12;

'*min\_samples\_leaf*' від 3 до 15;

'*min\_samples\_split*' від 6 до 12

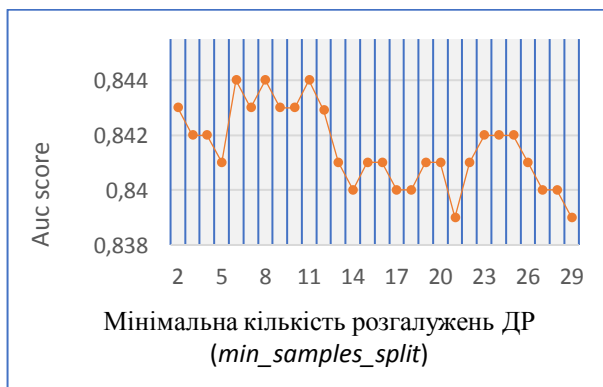
точність класифікатору на основі дерев рішень є найкращою.



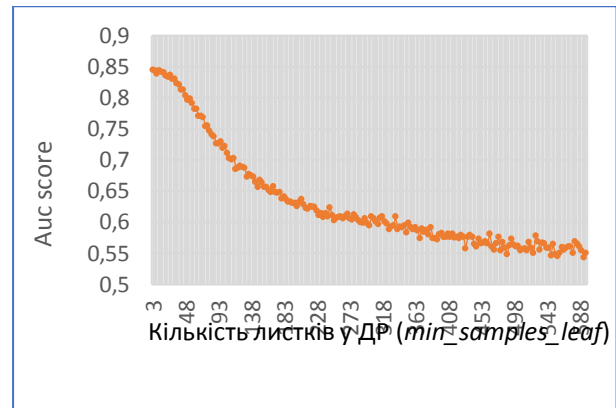
**Рис. 2.** Залежність точності класифікації ДР від кількості вихідних атрибутів (ознак)



**Рис.3.** Залежність точності класифікації від максимальної глибини дерева рішень



**Рис. 4.** Залежність точності класифікації ДР від мінімальної кількості розгалужень дерева рішень

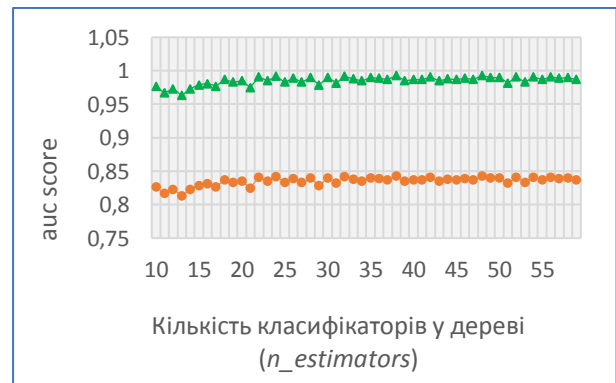


**Рис. 5.** Залежність точності класифікації ДР від кількості листків дерева рішень

Досліджено залежність точності класифікації від кількості дерев рішень ансамблю (рис. 6) на тестовій та навчальній вибірках.

Отримано, що оптимальна кількість класифікаторів у ансамблі (*max\_number*) складає від 33 до 43 ДР.

При цьому налаштування класифікаторів дозволило збільшити точність класифікації на навчальній вибірці до 97%, точність класифікації на тестовій вибірці – до 85%.



**Рис. 6.** Залежності точності класифікації від кількості дерев рішень ансамблю (круглі маркери знизу – для тестової вибірки, трикутні маркери вгорі – для тренувальної вибірки)

## Висновки

У даній роботі досліджено використання бегінг-класифікаторів на основі мета-алгоритмів:

*Pasting Ensemble*,  
*Bootstrap Ensemble*,  
*Random Subspace Ensemble*,  
*Random Patches Ensemble*,  
*Random Forest*

для ідентифікації стану комп'ютерної системи.

У якості вихідних даних використано показники функціонування КС.

Точність роботи класифікаторів оцінено за допомогою ROC-аналізу.

Отримано, що за умови стандартного налаштування найбільш якісним є класифікатори на основі алгоритму *Random Forest*, ROC AUC яких складає 87% на навчальній вибірці.



Виконано налаштування класифікаторів. Отримано, що при наступних параметрах налаштування; 'max\_depth' від 9; 'max\_features' від 7 до 12; 'min\_samples\_leaf' від 3 до 15; 'min\_samples\_split' від 6 до 12 точність класифікатору на основі дерев рішень є найкращою.

Досліджено залежність точності класифікації від кількості дерев рішень ансамблю.

Отримано, що оптимальна кількість класифікаторів у ансамблі (max\_number) складає від 33 до 43 дерев рішень. При цьому, налаштування дерев рішень та вибір кількості дерев рішень ансамблю дозволило збільшити точність ідентифікації на основі мета-алгоритму *Random Forest*, *ROC AUC* класифікатору на навчальній вибірці складає 97%, на тестовій вибірці – 85%.

За результатами досліджень запропоновано метод ідентифікації стану комп'ютерні системи, який відрізняється від відомих вибором мета-алгоритму класифікації та підбором оптимальних параметрів його налаштування.

Розроблений метод реалізований програмно і досліджений під час розв'язання задачі ідентифікації стану функціонування комп'ютерні системи.

Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого методу, що надає можливість рекомендувати його для практичного використання з метою підвищення точності ідентифікації стану комп'ютерної системи.

Перспективи подальших досліджень можуть полягати в проведенні розробки ансамблю нечітких дерев рішень.

#### REFERENCES

1. Alpaydin E. *Mashinnoe obuchenie: novyj iskusstvennyj intellekt*. Moskva: Izdatel'skaya gruppa «Tochka», 2017. 208 p.
2. Marmanis H. *Algoritmy intellektual'nogo interneta. Peredovye metodiki sbora, analiza i obrabotki dannyh*. Sb-P, M: Simvol, 2011. 468 p.
3. Flah P. *Mashinnoe obuchenie. Nauka i iskusstvo postroeniya algoritmov, kotorye izvlekayut znaniya iz dannyh*. Moskva: DMKPress, 2015. 400 p.
4. Tarhov D. A. *Nejrosetevye modeli i algoritmy*. Moskva: Radiotekhnika, 2014. 352 p.
5. Kaftannikov I. L., Parasich A. V. *Osobennosti primeneniya derev'ev reshenij v zadachah klassifikacii*. *Vestn. YUUrGU. Ser. «Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika»*. 2015, T. 15, № 3. PP. 26–32.
6. Cha Zhang. *Ensemble Machine Learning. Methods and Applications*. New York Dordrecht Heidelberg London: Springer, 2012. 329 p.
7. Vipin Kumar. *The Top Ten Algorithms in DataMining*. Taylor & Francis Group, LLC, 2009. 2006 p.
8. *Metody postroeniya derev'ev reshenij v zadachah klassifikacii v Data*. URL: [https://ami.nstu.ru/~vms/lecture/data\\_mining/trees.htm](https://ami.nstu.ru/~vms/lecture/data_mining/trees.htm) (last accessed November 15, 2021).
9. Subbotin S.O. *Postroenie derev'ev reshenij dlya sluchaya maloinformativnyh priznakov*. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2019. № 1. PP. 122-130.
10. Marcelo Bacher, Irad Ben-Gal, Erez Shmueli. *An information theory subspace analysis approach with application to anomaly detection ensembles.*, *Proceedings of the 9th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management*, 2017. V. 1, PP. 27–39.
11. Vinutha H.P., Basavaraju Poornia. *Analysis of Feature Selection and Ensemble Classifier Methods for Intrusion Detection*. *International Journal of Natural Computing Research*, 2018. N1. PP. 57-72.
12. Archish Rai Kapil. *Bagging*. URL: <https://www.datavedas.com/bagging/> (last accessed November 15, 2021).

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Алпайдин Э. *Машинное обучение: новый искусственный интеллект*. Москва: Издательская группа «Точка», 2017. 208 с.
2. Марманис Х. *Алгоритмы интеллектуального интернета. Передовые методики сбора, анализа и обработки данных*. Сб-П, М: Символ, 2011. 468 с.
3. Флах П. *Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных*. Москва: ДМКПресс, 2015. 400 с.
4. Тархов Д. А. *Нейросетевые модели и алгоритмы*. Москва: Радиотехника, 2014. 352 с.
5. Кафтаников И. Л., Парасич А. В. *Особенности применения деревьев решений в задачах классификации*. *Вестн. ЮУрГУ. Сер. «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2015, Т. 15, № 3. С. 26–32.
6. Cha Zhang. *Ensemble Machine Learning. Methods and Applications*. New York Dordrecht Heidelberg London: Springer, 2012. 329 p.
7. Vipin Kumar. *The Top Ten Algorithms in DataMining*. Taylor & Francis Group, LLC, 2009. 2006 p.
8. *Методы построения деревьев решений в задачах классификации*. URL: [https://ami.nstu.ru/~vms/lecture/data\\_mining/trees.htm](https://ami.nstu.ru/~vms/lecture/data_mining/trees.htm) (дата звернення: 15.11.2021).
9. Субботин С.О. *Построение деревьев решений для случая малоинформативных признаков*. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2019. № 1. С. 122-130.
10. Marcelo Bacher, Irad Ben-Gal, Erez Shmueli. *An information theory subspace analysis approach with application to anomaly detection ensembles*, *Proceedings of the 9th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management*, 2017. V. 1, PP. 27–39.
11. Vinutha H.P., Basavaraju Poornia. *Analysis of Feature Selection and Ensemble Classifier Methods for Intrusion Detection*. *International Journal of Natural Computing Research*, 2018. N1. PP. 57-72.
12. Archish Rai Kapil. *Bagging*. URL: <https://www.datavedas.com/bagging/> (дата звернення: 15.11.2021).

Received (Надійшла) 23.09.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 03.11.2021

## ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Гавриленко Світлана Юрїївна** – доктор технічних наук, професорка, професорка кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна;

**Svitlana Gavrylenko** – Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Department of "Computer Engineering and Programming", National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [gavrilenko08@gmail.com](mailto:gavrilenko08@gmail.com); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6919-0055>.

**Горносталь Олексій Андрійович** – аспірант кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна;

**Oleksii Hornostal** – PhD Student of Department of "Computer Engineering and Programming", National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [gornostalaa@gmail.com](mailto:gornostalaa@gmail.com); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5820-9999>.

**Разработка метода идентификации состояния компьютерных систем  
на основе беггинг-классификаторов**

С. Ю. Гавриленко, А. А. Горносталь

**Аннотация.** Предметом исследования есть методы и средства идентификации состояния компьютерной системы. **Цель статьи** – повышение качества идентификации состояния компьютерной системы за счет разработки метода на основе ансамблевых классификаторов. **Задание:** исследовать методы построения беггинг классификаторов на основе деревьев решений, выполнить их настройки и разработать метод идентификации состояния КС. **Используемые методы:** методы искусственного интеллекта, машинного обучения, ансамблевые методы. **Получены следующие результаты:** исследовано использование беггинг классификаторов на основе мета-алгоритмов: *Pasting Ensemble*, *Bootstrap Ensemble*, *Random Subspace Ensemble*, *Random Patches Ensemble* и *Random Forest* для идентификации состояния компьютерной системы, выполнена оценка их точности. Выполнены исследования параметров настройки отдельных деревьев решений и найдены их оптимальные значения, а именно: максимальное количество признаков, используемых при построении дерева; минимальное количество ветвлений при построении дерева; минимальное количество листьев и максимальную глубину дерева. Определено оптимальное количество деревьев решений ансамбля. Предложен метод идентификации состояния компьютерной системы, отличающийся от известных выбором мета-алгоритма классификации и подбором оптимальных параметров его настройки. Проведена оценка точности разработанного метода идентификации состояния компьютерной системы. Разработанный метод реализован программно и исследован при решении задачи идентификации аномального состояния функционирования компьютерной системы. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов заключается в разработке метода идентификации состояния компьютерной системы за счет выбора мета-алгоритма классификации и определения оптимальных параметров его настройки.

**Ключевые слова:** компьютерная система; события операционной системы; деревья решений; ансамблевые методы; мета-алгоритм; беггинг; *Random Forest*.

**Development of a method for identification of the state of computer systems  
based on bagging classifiers**

Svitlana Gavrylenko, Oleksii Hornostal

**Abstract.** The subject of the research is methods and means of identifying the state of a computer system. The purpose of the article is to improve the quality of computer system state identification by developing a method based on ensemble classifiers. **Task:** to investigate methods for constructing bagging classifiers based on decision trees, to configure them and develop a method for identifying the state of the computer system. **Methods used:** artificial intelligence methods, machine learning, ensemble methods. **The following results were obtained:** the use of bagging classifiers based on meta-algorithms were investigated: *Pasting Ensemble*, *Bootstrap Ensemble*, *Random Subspace Ensemble*, *Random Patches Ensemble* and *Random Forest* methods and their accuracy were assessed to identify the state of the computer system. The research of tuning parameters of individual decision trees was carried out and their optimal values were found, including: the maximum number of features used in the construction of the tree; the minimum number of branches when building a tree; minimum number of leaves and maximum tree depth. The optimal number of trees in the ensemble has been determined. A method for identifying the state of the computer system is proposed, which differs from the known ones by the choice of the classification meta-algorithm and the selection of the optimal parameters for its adjustment. An assessment of the accuracy of the developed method for identifying the state of a computer system is carried out. The developed method is implemented in software and investigated when solving the problem of identifying the abnormal state of the computer system functioning. **Conclusions.** The scientific novelty of the results obtained lies in the development of a method for identifying the state of the computer system by choosing a meta-algorithm for classification and determining the optimal parameters for its configuration.

**Keywords:** computer system; operating system events; decision trees; ensemble methods; meta-algorithm; bagging; *Random Forest*.

В. О. Гороховатський<sup>1</sup>, Н. В. Власенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний економічний університет імені С. Кузнеця, Харків, Україна

## РЕДУКЦІЯ ОПИСУ ЗОБРАЖЕННЯ У СКЛАДІ МНОЖИНИ ДЕСКРИПТОРІВ НА ОСНОВІ МЕТРИЧНОГО КРИТЕРІЮ ІНФОРМАТИВНОСТІ

**Анотація.** Предметом досліджень статті є класифікатори зображень за множиною дескрипторів ключових точок. Метою є підвищення продуктивності методів класифікації, зокрема, скорочення обчислювальних затрат шляхом впровадження на попередньому етапі оброблення апарату редукції для подання еталонних даних. Методи, що застосовуються: метричний апарат у векторному просторі, моделі для оцінювання інформативності даних, методи пошуку в масивах даних, моделі для визначення релевантності векторів та множин векторів, програмне моделювання. Отримані результати: розроблено метод редукції даних для задач класифікації зображень на основі впровадження метричних критеріїв для оцінювання інформативності елементів структурного опису зображення, що скорочує опис та прискорює обчислення; час класифікації для розглянутих експериментальних описів пропорційно скорочується зі зменшенням об'єму опису; для модельного експерименту досягнуто скорочення часу класифікації у п'ять разів при зменшенні обсягу опису у два рази; проведене моделювання підтверджує працездатність та результативність запропонованого методу в аспекті забезпечення якості класифікації з використанням засобів редукції. Практична значущість роботи – побудова моделей для оцінювання ступеня інформативності для образів візуальних даних; підтвердження працездатності запропонованих модифікацій засобів аналізу даних, розроблення прикладних програмних моделей для впровадження запропонованих методів редукції даних та класифікації зображень у системах комп'ютерного зору.

**Ключові слова:** комп'ютерний зір; структурні методи класифікації зображень; редукція опису; інформативність даних; метричний критерій; швидкодія класифікації.

### Вступ

Стиснення обсягу даних шляхом відбору серед наявної численної множини аналізованих ознак найбільш інформативної підмножини є важливим завданням розробників сучасних інтелектуальних систем [1-3]. Вирішення цієї задачі загалом сприяє підвищенню ефективності систем розпізнавання даних шляхом суттєвого скорочення обчислювальних та апаратних затрат. Особливо актуальною ця задача є для систем комп'ютерного зору, де задля розпізнавання візуальних об'єктів часто застосовується багато-параметричне та одночасно досить об'ємне подання аналізованих даних [1-7].

При розробленні класифікаторів на підґрунті образу як множини дескрипторів ключових точок (КТ) зображення ознаками безпосередньо є дескриптори – числові (бінарні) вектори, а у якості основного принципу для визначення класу об'єкта застосовуються метричні співвідношення як для окремих компонентів опису, так і для скінчених множин векторів.

На рис. 1 показано зображення і координати виділені на ньому КТ (як центри кілець). Кожна КТ характеризується своїм дескриптором.

Метричні співвідношення у просторі дескрипторів фізично відображають близькість (еквівалентність) відповідних фрагментів зображення із врахуванням допустимих геометричних перетворень об'єктів, що виникають у процесі візуального спостереження [2].

Критерії прийняття рішень із врахуванням оцінок інформативності даних знайшли впровадження у сучасних методах data science, наприклад, при побудові дерев рішень у класифікаторах зображень на основі кластерного подання множин дескрипторів КТ [3, 8, 9].



Рис. 1. Зображення та координати КТ

У нашій статті [3] вивчається результативність класифікаторів із використанням дерева рішень на

підставі застосування статистичних критеріїв приросту інформації, заснованих на показниках інформаційної ентропії Шеннона,  $\alpha$ -ентропії Рен'ї та коефіцієнту Джині.

Для редукції опису візуальних об'єктів у вигляді множини дескрипторів КТ раніше застосовувалися такі критерії, як рівень стійкості відносно дії геометричних перетворень, повторюваність значень на множині дескрипторів власного та решти класів в умовах перетворень, побудова статистичних процентильних відношень для описів [1], в тому числі на основі визначення медоїду для множини векторів [2].

Одним із результативних засобів редукції даних є здійснення кластеризації для множини компонентів опису із подальшим використанням для класифікації значень визначених центрів побудованих кластерів чи кількісних параметрів для кластерів еталонних зображень [9, 10]. У той же час застосування критеріїв інформативності метричного типу [4, 5], що безпосередньо ґрунтуються на значенні подібності для складових компонентів опису, вивчено ще недостатньо, хоча переважна частина методів класифікації базується виключно на принципах визначення подібності, тобто метричні співвідношення у просторі ознак є переважаючими у порівнянні з іншими, в тому числі статистичними [1, 8, 13].

У дослідженнях з інтелектуального аналізу даних запропоновано систему критеріїв [4, 5], де інформативність ознак визначається виходячи із місцезнаходження екземплярів різних класів у просторі ознак. Розроблена система критеріїв метричного типу на підставі індивідуальних оцінок для окремих ознак дає можливість оцінювати також гуртову інформативність для підмножин ознак при вирішенні задач класифікації і регресії [4–7].

Важливо при застосуванні метричних моделей у таких методах класифікації як, наприклад, метод ближніх сусідів, цілеспрямовано знизити розмірність еталонних описів шляхом відбору із наявної повної множини ознак її редукованої підмножини значно меншої потужності за якимось критерієм. Справа в тому, що еталонні описи безпосередньо, гуртом і не однократно приймають участь у процесах розпізнавання [8]. Головна мета при цьому – зниження впливу «прокляття розмірності» при впровадженні класифікаторів у прикладних системах, де кількість еталонів часто вимірюється десятками та сотнями.

У дослідженні [13] детально вивчаються властивості та результати застосування метричних підходів у задачах кластеризації та класифікації багатовимірних даних. Зокрема, як критерій якості кластеризації вивчається поняття функції силуету, що відображає нормовану різницю між середніми відстанями кожної точки даних до множини точок власного та сусіднього кластерів. Розглядаються також оцінки середніх значень силуету у окремих кластерах і у всьому наборі даних. Розроблено також ряд методів, наприклад, Relief [17], для формування ефективної стисненої системи ознак на основі метричних критеріїв та статистичного аналізу даних. Однак швидкий розвиток систем аналізу даних та їх застосувань потребує подальшого удосконалення

існуючих методів і пошуку нових моделей редукції задля забезпечення потрібної результативності в умовах обмеження на час оброблення.

### Побудова метричного критерію інформативності для множини дескрипторів

Розглянемо деяку базу із  $N$  еталонів у вигляді множини  $E$  описів еталонних зображень:  $E = \{E_1, E_2, \dots, E_N\}$ .  $E$  – це навчальна вибірка. Кожний еталонний опис  $E_k \subset E$  у задачі класифікації репрезентує окремий клас. Опис окремого еталону  $E_k = \{e_v(k)\}_{v=1}^s$  – це скінченна множина дескрипторів КТ у просторі  $B^n$ ,  $e_v(k) \in B^n$ ,  $s = \text{card } E_k$  – число дескрипторів у множині [1]. Кожний дескриптор  $e_v(k)$  бази  $E$  має параметр  $k$  номеру класу, а загальне число ознак – дескрипторів у базовій множині  $E$  складає  $\text{card } E = sN$ .

Введемо у просторі  $B^n$  дескрипторів відстань  $\rho(z_1, z_2)$ ,  $\forall z_1, z_2 \in B^n$ ,  $\rho: B^n \times B^n \rightarrow R(B^n)$ ,  $R(B^n)$  – простір значень метрики  $\rho$ , що встановлює величину метричного відношення відмінності між векторами із  $B^n$ . У випадку бінарних даних відстань  $\rho(z_1, z_2)$  може бути метрикою Хемінга [1]:

$$\rho(z_1, z_2) = \sum_{v=1}^n 1(z_{1,v}, z_{2,v}), \quad (1)$$

де функція  $1(z_{1,v}, z_{2,v})$  порівнює відповідні біти з номером  $v$  для двох бінарних векторів і отримує значення 1 у випадку їх співпадання і 0 – у протилежному випадку.

Для довільного вектора  $z \in E$  у системі класів як складового елемента  $z \in E_k$  фіксованого еталонного опису  $E_k$  з номером  $k$  введемо поняття інформативності  $V(z, E)$  у складі бази  $E$  [4]

$$V(z, E) = \rho_m(z, \bar{E}_k) - \rho_m(z, E_k), \quad (2)$$

де  $\rho_m(z, \bar{E}_k) = \min_{v, i \neq k} \rho(z, e_v(i))$  – мінімальна відстань від  $z$  до елемента бази, що не належить класу  $E_k$ ,  $\rho_m(z, E_k) = \min_{v, i=k} \rho(z, e_v(i))$  – відстань від  $z$  до найближчого елемента із класу  $E_k$  (за виключенням нульової відстані  $\rho(z, z) = 0$  самого до себе,  $z \in E_k$ ). При впровадженні нормованих відстаней із величиною  $0 \leq \rho \leq 1$  оцінювані значення критерію (2) знаходяться в інтервалі  $-1 \leq V \leq 1$ . У методі Relief використовується один із варіантів моделі (2), де інформативність оцінюється як різниця квадратів відстаней, а відбір аналізованих ознак здійснюється випадковим чином [17].

Використання формули (2) для визначення індивідуальної інформативності  $V$  щодо елемента опису  $z \in E_k$  засновано на припущенні про те, що інформативність ознаки є тим вищою, чим в більший

мірі вона розділяє екземпляри навчальної вибірки на класи. Виходячи з цього, чим далі від екземпляра класу знаходиться найближчий до нього екземпляр іншого класу, тим вищою є індивідуальна інформативність. У той же час, чим далі від екземпляра у просторі ознак знаходиться найближчий до нього елемент цього ж класу, тим нижчою є індивідуальна інформативність. Тобто впроваджується принцип: «ближче до своїх, подальше від інших».

На підставі варіантів моделі (2) може бути побудований спектр способів оцінювання інформативності в залежності від форми подання вхідних даних. Якщо до множини  $E$  попередньо впровадити кластерне подання, де еталонні дані  $E_k$  будуть представлені наборами визначених центрів  $\{c_k(j)\}_{j=1}^m$ ,  $m$  – фіксоване число центрів для кожного  $E_k$ , то визначення мінімуму в (2) може бути замінено на більш швидкісний пошук серед набору центрів кластерів, наприклад як

$$\rho_m(z, \bar{E}_k) = \min_{j=1, \dots, m, i \neq k} \rho(z, c_i(j)). \quad (2)$$

Зважаючи на те, що центри  $c_i(j)$  кластерів із-за їх способу обчислення взагалі можуть не належати простору дескрипторів, тут належить застосовувати більш універсальний тип метрики, наприклад, манхетенську відстань.

У виразі (2) замість центрів кластерів можуть бути використані інші представники опису, наприклад, процентильні точки множини  $E_k$ , отримані при медіанному поданні даних цієї множини [1, 10]. Для цього треба форматувати список дескрипторів із  $E_k$ , відсортований за значенням сумарної відстані до решти дескрипторів, що застосовується при визначенні медіої множини, і вибрати, наприклад, три представники із номерами, що відповідають дольовим значенням 0,25, 0,5, 0,75 щодо місця розташування у списку [2].

Зуважимо, що критерій (2) продуктивно буде враховувати відмінності між елементами свого класу тільки у випадку аналізу множини ознак, що не є значуще метрично близькими між собою всередині класу, так як для таких ознак для другої складової в (2) виконується  $\rho_m(z, E_k) \approx 0$ . Задля зниження впливу цього фактору множини  $E_i$  ознак еталонів на попередньому етапі можна додатково обробити з виключенням або врахуванням числа повторень щодо близьких елементів. Наприклад, попередньо можна скоротити описи  $E_i$  застосуванням логічної фільтрації з порогом  $\delta_\rho$ :  $\rho(z, e_v(i)) \leq \delta_\rho$ . З іншого боку, можна обчислити параметри ознак за виразом (2), а потім провести додатковий аналіз отриманих значень інформативності.

Таким чином, ознаки (2) з високими значеннями  $V \rightarrow 1$  індивідуальної інформативності будемо вважати значущими, тобто суттєво інформативними стосовно результативної класифікації, ознаки зі значеннями  $V \rightarrow -1$  вважаються малозначущими,

тобто є претендентами на виключення із системи ознак.

У випадку розпізнавання на множині багатьох класів (більше двох) з метою більш поглибленого аналізу можна у виразі (2) враховувати відстань не тільки до найближчого елементу з протилежним значенням класу, а, наприклад, як середню відстань до множини найближчих екземплярів кожного з можливих класів. В прикладному застосуванні таке усереднення іноді зважують ваговими коефіцієнтами класів у конкретній вибірці [4, 5]. Тоді відстань обчислюється з урахуванням зважування на частоту класів у вибірці.

Якщо для фіксованого елементу  $z$  структурно-го опису уже сформовано набір вагових коефіцієнтів  $\{\alpha_i\}_{i=1}^N$  щодо віднесення його до множини класів у вигляді [8, 18]

$$z \rightarrow (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N), \quad z \in E_k, \quad \sum_{i=1}^N \alpha_i = 1, \quad (4)$$

то інформативність ознаки  $z$  на підґрунті моделі (4) можна оцінити величиною різниці власного та максимального коефіцієнтів серед решти класів

$$V(z, E) = \alpha_k - \max_{i \neq k} \alpha_i. \quad (5)$$

Зуважимо, що оцінювання критеріїв (4), (5) здійснюється на підставі аналізу метричних співвідношень для значень елементів опису та визначених параметрів  $c_i(j)$  центрів еталонних класів [8, 18].

### Оцінювання гуртової інформативності

На основі обчислення індивідуальних критеріїв (2)-(5) може бути впроваджено критерій сукупної інформативності  $V(Z)$  для довільної підмножини ознак  $Z^* \subseteq Z$ , який буде визначатися, наприклад, як середнє значення для набору індивідуальних коефіцієнтів [4]

$$V(Z^*) = \frac{1}{\text{card } Z^*} \sum_{z \in Z^*} V(z, E). \quad (6)$$

Критерій (6) універсально може бути використано для будь-якої підмножини  $Z^*$ , в тому числі стосовно описів окремих еталонів  $E_k$ , що дасть змогу скоротити обсяги описів для складників бази  $E$ . Поряд із усередненням даних у (6) можна застосувати інші способи узагальнення для набору значень інформативності елементів, наприклад, як результат визначення медіани [1, 10]

$$V(Z) = \text{med} \{V(z, E)\}, \quad z \in Z, \quad (7)$$

де  $\text{med}$  – медіана для набору значень інформативності серед компонентів  $Z$ .

Критерії (6), (7) природнім чином враховують можливу повторюваність чи близькість ознак всередині опису.

Критерії (2) – (5) безпосередньо можна застосувати з метою редукції багаточисельної множини наявних ознак шляхом відбору найбільш інформативної підмножини дескрипторів еталонних описів

зادля цілеспрямованого скорочення обчислювальних затрат на класифікацію. Критерії (6), (7) може бути застосовано для оцінювання і порівняння результативності щодо впровадження різних варіантів уже сформованого стисненого комплексу ознак.

Безпосередньо редукована система ознак із використанням значення інформативності може бути сформована рядом способів, наприклад [2, 14, 15]:

- відбором фіксованої кількості інформативних ознак [2];
- визначенням числа ознак із інформативністю вище заданого порогу;
- формуванням інформативної підмножини ознак, що забезпечує необхідну результативність.

Зрозуміло, що впровадження процедури секвестрування системи ознак потребує додаткових обчислювальних витрат. Із виразів (2)–(5) видно, що такі витрати порівняні із визначенням відстані між множинами векторів. Але загалом процедура зниження потужності множини ознак реалізується на етапі попереднього оброблення даних, що ніяким чином не впливає на часові затрати у процесі класифікації.

Однозначно ключовим завданням стиснення системи ознак у системах комп'ютерного зору є забезпечення високої результативності класифікації візуальних образів. Введення скороченої системи ознак потребує також деяких модифікацій і для методу класифікації. Наприклад, якщо необхідно виконати відповідне секвестрування для описів класифікованих зображень, то для новоствореної системи ознак варто підтвердити її класифікаційну ефективність у порівнянні із використанням повної системи.

Для обчислення значень інформативності як варіанту дії з множинами векторів може бути успішно використано методи упорядкування вибірки ознак-векторів за значенням деякого критерію або засобів прискорення пошуку даних [9-11].

У обговорюваних моделях для визначення інформативності у якості ознак використовуються безпосередньо дескриптори КТ. Відмітимо, що ці ж моделі можуть бути впроваджені також і для будь-якої системи ознак, що є функцією від множини дескрипторів, наприклад, для статистичних центрів множини [2].

Використання запропонованих критеріїв для оцінювання ступеня інформативності та відбору системи інформативних ознак дає можливість у задачах розпізнавання візуальних образів знижувати структурну та обчислювальну складність синтезованих моделей класифікації, підвищувати їх інтепретованість (розуміння людиною) і узагальнювальні властивості за рахунок виключення малозначущих, взаємозалежних і надлишкових ознак [18-24].

Оцінювання міри релевантності двох множин А, В однотипних векторів, в тому числі і редукованих, можна здійснити традиційним шляхом, наприклад, з використанням метрик [1, 13]. Застосуємо для цього відстань Хаусдорфа

$$X(A, B) = \max_{a \in A} \{ \max_{b \in B} \rho(a, B), \max_{b \in B} \rho(b, A) \}, \quad (8)$$

де  $\rho(a, B) = \min_{b \in B} \rho(a, b)$ ,  $\rho$  – метрика для векторів (наприклад, відстань Хемінга), та відстань Танімото (Жаккара), яка означає відношення числа елементів симетричної різниці та об'єднання аналізованих множин

$$T(A, B) = \frac{\text{card}(A \Delta B)}{\text{card}(A \cup B)}. \quad (9)$$

## Результати моделювання

Для перевірки прикладної вагомості теоретичних викладок нами програмно змодельовані дві скінченні множини бінарних векторів із 100 елементів із компонентами у 32 біти. Елементи множин різнилися фіксованими ймовірностями появи одиниць у наборі із 32 бітів. Для визначення подібності між множинами векторів застосовано метрики (8) Х Хаусдорфа та (9) Т Танімото, де у якості внутрішньої метрики між елементами (бінарними векторами) використано відстань Хемінга [2].

Для двох масивів векторів з ймовірностями появи 1:  $p_1 = 0,5$  та  $p_2 = 0,2$  отримано значення метрик  $X = 12$ ,  $T = 0,85$ . Як еквівалентність векторів у (9) застосовано повне їх співпадіння. Нормована метрика Т для нашого прикладу приймає значення із відрізка [0,1], а метрика Х – цілі значення із відрізка [0,32]. Як бачимо, за метрикою Танімото ці множини суттєво відрізняються, а за метрикою Хаусдорфа – різняться приблизно на третину діапазону значень.

Обчислення за виразом (2) значень інформативності показали, що для обох множин інформативність елементів опису змінюється приблизно у однакових межах: -11,...,3 для першої множини і -11,...,5 – для другої (рис. 2).

Множина 1
[-10, -3, 0, -1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, -11, 0, -1, 1, 0, 0, 0, -2, -10, 0, 0, -8, 0, 1, -10, -10, -1, 1, 0, -1, -3, 1, 0, 0, 0, 3, -10, -10, 2, 0, 0, 0, 0, 2, -1, -10, 2, -10, 2, 1, -7, -9, 1, 1, -9, -2, 2, -9, -1, -1, -7, -1, 0, -10, 1, -9, 0, 1, -7, 0, -1, -2, -3, 0, 3, 1, -1, -1, 0, -1, 2, 0, 0, 0, -10, -11, 0, -11, 0, 2, 0, -10, -1, -9, -8, -1, 3, -9]
Множина 2
[0, 1, -2, 2, 0, -1, -2, 2, -3, -1, 1, 2, 0, 0, 1, 0, 0, 2, -2, 1, 1, 5, -1, 0, 3, 1, -1, 1, 3, 3, -1, 0, 0, 1, 0, 4, 0, 2, -1, 0, -2, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 2, 1, 0, 3, 1, -1, 1, 1, -1, -1, 0, 2, 0, 1, 0, 1, -2, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 2, 0, 0, -7, -9, -7, -10, -10, -7, -10, -9, -9, -10, -6, -9, -11, -6, -10, -9, -10, -8, -9, -10, -10, -10, -10, -9, -10]

Рис. 2. Значення інформативності (2) для експериментальних множин векторів

За отриманими оцінками відібрано по 50 найбільш інформативних елементів кожної із множин із загального їх числа 100. Для них отримано такі значення метрик:  $X = 13$ ,  $T = 1$ .

Бачимо, що за результатами редукції множин (у 2 рази зменшуються обчислювальні витрати) значення метрики Хаусдорфа збільшилось від 12 для повного опису до 13 для редукованого (трохи зменшилась подібність), а значення метрики Танімото зросло від 0,85 до 1 відповідно.

Зрозуміло, що значення оцінок напряму залежать від складу множин. Для інших експериментальних варіантів вхідних даних, отриманих змішуванням векторів із двох розглянутих множин, відстань Танімото за результатом редукування збільшилася від значення 0,70 для повного опису до 1 для скороченого. Як бачимо, в результаті редукації даних відстані між аналізованими описами зростають, що загалом може сприяти підсиленню результативності класифікації.

У той же час швидкодія оброблення редукованих множин має суттєве покращення. У контексті обчислення відстані між описами для метрики Хаусдорфа швидкодія обчислень складала 5,04 мілісекунди для редукованих множин у порівнянні з 26 мілісекундами для повних, тобто покращилася у п'ять разів! Для метрики Танімото отримані результати виміру швидкодії становлять 0,294 мілісекунди та 1,45 мілісекунди для редукованого і повного описів відповідно.

Як бачимо, після редукування множин швидкодія обчислення відстаней між описами за отриманими ознаками як для метрики Танімото, так і для метрики Хаусдорфа у п'ять разів більша, ніж при обчисленні відстаней у випадку роботи із повними описами.

Проведене пробне моделювання цілком підтверджує практичну можливість ефективного впровадження метричного критерію інформативності задля значимого скорочення обчислювальних витрат на класифікацію для описів як множини дескрипторів

КТ. Об'єм аналізованих даних у експерименті скорочено у 2 рази, швидкодія оброблення при цьому зростає у п'ять разів, а рівень відмінностей між описами змінюється незначно, і навіть трохи зростає. Усі ці фактори загалом сприяють забезпеченню результативної класифікації.

## Висновки

Метричні критерії інформативності даних, що застосовуються на етапі попереднього аналізу, приносять суттєвий виграв у швидкодії оброблення при класифікації зображень за множиною дескрипторів ключових точок.

Наукова новизна дослідження полягає у введенні результативних засобів стиснення множини еталонних даних, що значним чином прискорює класифікацію зображень з використанням структурних методів.

Прикладна цінність роботи полягає у розробленні програмних моделей для стиснення множини ознак, класифікації з використанням засобів редукування, а також у експериментальному підтвердженні результативності впровадження модифікованих описів у задачі класифікації.

Перспективи дослідження полягають у застосуванні запропонованих принципів аналізу даних безпосередньо до експериментальних множин дескрипторів, отриманих для реальних зображень. Використання моделей метричного критерію гуртової інформативності теж потребує подальшого вивчення.

## REFERENCES

1. Gorokhovatskiy V.O., Gadetska S.V. (2020) Statistical processing and data mining in structural image classification methods (monograph), Kharkiv, FLP Panov A.N., 128 p., DOI: 10.30837/978-617-7859-69-6.
2. Gorokhovatskiy V.A. Compression of Descriptions in the Structural Image Recognition. Telecommunications and Radio Engineering. – 2011, Vol. 70, No 15. – P. 1363–1371.
3. Gadetska S., Gorokhovatskiy V., Stiahlyk N. (2020) STUDY OF STATISTICAL PROPERTIES OF THE BLOCK SUPPLY MODEL FOR A NUMBER OF DECORATORS OF KEY POINTS OF IMAGES. Radio Electronics, Computer Science, Control, №3, p. 78–87. – doi: 10.15588/1607-3274-2020-3-7.
4. Oliinyk, A., Subbotin, S., Lovkin, V., Blagodariov, O., Zaiko, T. The System of Criteria for Feature Informativeness Estimation in Pattern Recognition. Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2017. – № 4. – С. 85–96.
5. Kira, K. A practical approach to feature selection / K. Kira, L. Rendell // Machine Learning : International Conference on Machine Learning ML92, Aberdeen, 1-3 July 1992 : proceedings of the conference. – New York: Morgan Kaufmann, 1992. – P. 249–256.
6. Computational intelligence: a methodological introduction / [R. Kruse, C. Borgelt, F.Klawonn et. al.]. – London : Springer-Verlag, 2013. – 488 p.
7. Nong Ye. Data Mining: Theories, Algorithms, and Examples (1st. ed.). CRC Press, Inc., USA – 2013
8. Daradkeh, Y.I., Gorokhovatskiy, V., Tvoroshenko, I., Gadetska, S., and Al-Dhaifallah, M. (2021) Methods of Classification of Images on the Basis of the Values of Statistical Distributions for the Composition of Structural Description Components, IEEE Access, 9, pp. 92964-92973, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3093457
9. Gorokhovatskiy, O., Gorokhovatskiy, V., and Peredrii, O., (2018) Analysis of Application of Cluster Descriptions in Space of Characteristic Image Features, Data, 3(4), 52. – doi: 10.3390/data3040052. Available online: <https://www.mdpi.com/2306-5729/3/4/52>
10. Kohonen, T., (2001) Self-Organizing Maps, Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 502 p.
11. Leskovets, Yure, Radzharaman, Anand, Ulman, Dzheffry D. (2016) Analyzing large datasets, Moscow, DMK Press, 2016. – 498 p.
12. Q. Bai, S. Li, J. Yang, Q. Song, Z. Li, and X. Zhang, "Object Detection Recognition and Robot Grasping Based on Machine Learning: A Survey," IEEE Access, vol. 8, pp. 181855–181879, Oct. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3028740.
13. P. Flach. Machine learning. The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012.
14. Stańczyk U. Feature Evaluation by Filter, Wrapper, and Embedded Approaches. In: Stańczyk U., Jain L. (eds) Feature Selection for Data and Pattern Recognition. Studies in Computational Intelligence. 2015. Springer, Berlin, Heidelberg, vol. 584, 568 p.

15. Gavrilenko, S.Yu., Sheverdin, I.V., Geiko, G.V. Assessment of informativeness and selection of features in identifying the state of the computer system. *Modern information systems*, 2021, т.5, No2, с.5-12, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.01>
16. Gadetska, S.V., Gorokhovatsky, V.O. Statistical Measures for Computation of the Image Relevance of Visual Objects in the Structural Image Classification Methods. *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2018, Vol. 77 (12), pp. 1041–1053.
17. Robnik-Sikonja, M., Kononenko, I. (2003). Theoretical and empirical analysis of ReliefF and RReliefF. *Machine Learning* 53 (1-2): 23-69.
18. Gorokhovatsky V.O., Gadetska S. V., Stiahlyk N. I., Vlasenko N. V. (2020) CLASSIFICATION OF IMAGES BASED ON AN ENSEMBLE OF STATISTICAL DISTRIBUTIONS BY CLASSES OF ETALONS FOR STRUCTURAL DESCRIPTION COMPONENTS. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, №4, p. 85–94. – DOI 10.15588/1607-3274-2020-4-9
19. A. V. Gorokhovatsky, V.A. Gorokhovatsky, A.N. Vlasenko, N.V. Vlasenko Quality Criteria for Multidimensional Object Recognition Based Upon Distance Matrices. *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2014, Vol. 73, No 18. – P. 1661 – 1670.
20. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study, *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*, pp. 593-597, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>
21. Xu Zhang, Felix X. Yu, Svebor Karaman, Shih-Fu Chang. Learning Discriminative and Transformation Covariant Local Feature Detectors. *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 6818-6826.
22. Q. Bai, S. Li, J. Yang, Q. Song, Z. Li, and X. Zhang, “Object Detection Recognition and Robot Grasping Based on Machine Learning: A Survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 181855–181879, Oct. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3028740.
23. C. Celik, and H. Sakir, “Content based image retrieval with sparse representations and local feature descriptors: A comparative study,” *Pattern Recognit.*, vol. 68, pp. 1–13, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.patcog.2017.03.006.
24. M. Ghahremani, Y. Liu, and B. Tiddeman, “FFD: Fast Feature Detector,” *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 30, pp. 1153–1168, Jan. 2021, doi: 10.1109/TIP.2020.3042057.
25. Liu Z. Large-scale CelebFaces Attributes (CelebA) Dataset. URL: <https://mmlab.ie.cuhk.edu.hk/projects/CelebA.html>.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гороховатський, В.О., Гадецька, С.В. Статистичне оброблення та аналіз даних у структурних методах класифікації зображень (монографія), Харків, ФОП Панов А.Н., 2020, 128 с. DOI: 10.30837/978-617-7859-69-6.
2. Gorokhovatsky V.A. Compression of Descriptions in the Structural Image Recognition. *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2011, Vol. 70, No 15. – P. 1363–1371.
3. Гадецька С.В., Гороховатський В.О., Стяглік Н.І. (2020) Вивчення критеріїв інформативності даних при впровадженні апарату дерев рішень у методах структурної класифікації зображень. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*, №3, с. 78–87. – doi: 10.15588/1607-3274-2020-3-7.
4. Oliinyk, A., Subbotin, S., Lovkin, V., Blagodariov, O., Zaiko, T. The System of Criteria for Feature Informativeness Estimation in Pattern Recognition. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2017. – № 4. – С. 85–96.
5. Kira, K. A practical approach to feature selection / K. Kira, L. Rendell // *Machine Learning : International Conference on Machine Learning ML92*, Aberdeen, 1-3 July 1992 : proc. of the conf. New York: Morgan Kaufmann, 1992. P. 249–256.
6. *Computational intelligence: a methodological introduction* / [R. Kruse, C. Borgelt, F. Klawonn et. al.]. – London : Springer-Verlag, 2013. – 488 p.
7. Nong Ye. *Data Mining: Theories, Algorithms, and Examples* (1st. ed.). CRC Press, Inc., USA – 2013
8. Daradkeh, Y.I., Gorokhovatsky, V., Tvoroshenko, I., Gadetska, S., and Al-Dhaifallah, M. (2021) Methods of Classification of Images on the Basis of the Values of Statistical Distributions for the Composition of Structural Description Components, *IEEE Access*, 9, pp. 92964-92973, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3093457
9. Gorokhovatsky, O., Gorokhovatsky, V., and Peredrii, O., (2018) Analysis of Application of Cluster Descriptions in Space of Characteristic Image Features, *Data*, 3(4), 52. – doi: 10.3390/data3040052. Available online: <https://www.mdpi.com/2306-5729/3/4/52>
10. Kohonen, T., (2001) *Self-Organizing Maps*, Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 502 p.
11. Leskovets, Yure, Radzharaman, Anand, Ulman, Dzheffry D. (2016) *Analyzing large datasets*, Moscow, DMK Press, 2016. 498 p.
12. Q. Bai, S. Li, J. Yang, Q. Song, Z. Li, and X. Zhang, “Object Detection Recognition and Robot Grasping Based on Machine Learning: A Survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 181855–181879, Oct. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3028740.
13. P. Flach. *Machine learning. The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012.
14. Stańczyk U. Feature Evaluation by Filter, Wrapper, and Embedded Approaches. In: Stańczyk U., Jain L. (eds) *Feature Selection for Data and Pattern Recognition. Studies in Computational Intelligence*. 2015. Springer, Berlin, Heidelberg, vol. 584, 568 p.
15. Гавриленко, С.Ю., Швердін, І.В., Гейко, Г.В. Оцінка інформативності та вибір ознак при ідентифікації стану комп'ютерної системи. *Сучасні інформаційні системи*, 2021, т.5, No2, с.5-12, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.01>
16. Gadetska, S.V., Gorokhovatsky, V.O. Statistical Measures for Computation of the Image Relevance of Visual Objects in the Structural Image Classification Methods. *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2018, Vol. 77 (12), pp. 1041–1053.
17. Robnik-Sikonja, M., Kononenko, I. (2003). Theoretical and empirical analysis of ReliefF and RReliefF. *Machine Learning* 53 (1-2): 23-69.
18. Гороховатський В.О., Гадецька С.В., Стяглік Н.І., Власенко Н.В. (2020) Класифікація зображень на підставі ансамблю статистичних розподілів за класами еталонів для компонентів структурного опису. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*, №4, с. 85–94. – DOI 10.15588/1607-3274-2020-4-9
19. Gorokhovatsky A.V., Gorokhovatsky V.A., Vlasenko A.N., Vlasenko N.V. Quality Criteria for Multidimensional Object Recognition Based Upon Distance Matrices. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2014, Vol. 73, No 18. P. 1661 – 1670.



20. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study, Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018, pp. 593-597, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>
21. Xu Zhang, Felix X. Yu, Svebor Karaman, Shih-Fu Chang. Learning Discriminative and Transformation Covariant Local Feature Detectors. The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017, pp. 6818-6826.
22. Q. Bai, S. Li, J. Yang, Q. Song, Z. Li, and X. Zhang, "Object Detection Recognition and Robot Grasping Based on Machine Learning: A Survey," IEEE Access, vol. 8, pp. 181855–181879, Oct. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3028740.
23. C. Celik, and H. Sakir, "Content based image retrieval with sparse representations and local feature descriptors: A comparative study," Pattern Recognit., vol. 68, pp. 1–13, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.patcog.2017.03.006.
24. M. Ghahremani, Y. Liu, and B. Tiddeman, "FFD: Fast Feature Detector," IEEE Trans. Image Process., vol. 30, pp. 1153–1168, Jan. 2021, doi: 10.1109/TIP.2020.3042057.
25. Liu Z. Large-scale CelebFaces Attributes (CelebA) Dataset. URL: <https://mmlab.ie.cuhk.edu.hk/projects/CelebA.html>.

Received (Надійшла) 28.09.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.11.2021

#### ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Гороховатський Володимир Олексійович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Volodymyr Gorokhovatskyi** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Computer Science Department, Kharkiv National University of RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [gorohovatsky.vl@gmail.com](mailto:gorohovatsky.vl@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7839-6223>.

**Власенко Наталія Володимирівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформатики та комп'ютерної техніки, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, Харків, Україна;

**Nataliia Vlasenko** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Informatics and Computer Engineering, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [gorohovatskaja@gmail.com](mailto:gorohovatskaja@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6841-7086>.

#### Редукция описания изображения в составе множества дескрипторов на основе метрического критерия информативности

В. А. Гороховатский, Н. В. Власенко

**Аннотация.** Предмет исследований статьи – методы классификации изображений на множестве дескрипторов ключевых точек в системах компьютерного зрения. Целью является повышение производительности структурных методов классификации путем внедрения индексированных хэш-структур на множестве дескрипторов базы эталонных образов и согласованного цепного сочетания нескольких этапов анализа данных в процессе классификации. Применяемые методы: детектор и дескрипторы BRISK, средства хэширования данных, методы поиска в больших массивах данных, метрический аппарат определения релевантности векторов, программное моделирование. Полученные результаты: разработан эффективный метод классификации изображений на основе внедрения скоростного поиска с использованием индексированных хэш-структур, что ускоряет вычисления в десятки раз; выигрыш во времени вычислений увеличивается при возрастании числа эталонных и дескрипторов в описаниях; особенность классификатора состоит в том, что осуществляется не точный поиск, а с учетом допустимого отклонения данных от эталона; экспериментально проверена результативность классификации, что указывает на работоспособность и эффективность предложенного метода. Практическая значимость работы – построение моделей классификации в трансформированном пространстве хэш-представления данных, подтверждение работоспособности предложенных модификаций классификаторов на примерах изображений, разработка прикладных программных моделей для внедрения предложенных методов классификации в системах компьютерного зрения.

**Ключевые слова:** компьютерное зрение; структурные методы классификации изображений; дескриптор BRISK; хэширование с учетом близости; хэш-корзина; быстроедействие классификации.

#### The image description reduction in the set of descriptors on informativeness metric criteria base

Volodymyr Gorokhovatskyi, Nataliia Vlasenko

**Annotation.** The subject of the research is the methods of image classification on a set of key point descriptors in computer vision systems. The goal is to improve the performance of structural classification methods by introducing indexed hash structures on the set of the dataset reference images descriptors and a consistent chain combination of several stages of data analysis in the classification process. Applied methods: BRISK detector and descriptors, data hashing tools, search methods in large data arrays, metric models for the vector relevance estimation, software modeling. The obtained results: developed an effective method of image classification based on the introduction of high-speed search using indexed hash structures, that speeds up the calculation dozens of times; the gain in computing time increases with an increase of the number of reference images and descriptors in descriptions; the peculiarity of the classifier is that not an exact search is performed, but taking into account the permissible deviation of data from the reference; experimentally verified the effectiveness of the classification, which indicates the efficiency and effectiveness of the proposed method. The practical significance of the work is the construction of classification models in the transformed space of the hash data representation, the efficiency confirmation of the proposed classifiers modifications on image examples, development of applied software models implementing the proposed classification methods in computer vision systems.

**Keywords:** computer vision; structural methods of image classification; BRISK descriptor; hashing based on proximity; hash; classification performance.

# Methods of information systems synthesis

УДК 004.89

DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.03>

О. В. Барабаш, О. І. Бандурка, В. В. Шпурик, О. В. Свинчук

Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА АНАЛІЗУ ГЕОДАНИХ ДЛЯ ВІДСЛІДКОВУВАННЯ ЗМІН РОСЛИННОСТІ

**Анотація.** Швидке зростання можливостей геоінформаційних технологій в області обробки та аналізу просторових даних призвело до істотного зростання ролі геоінформаційних систем в різних областях людської діяльності. Застосування нових підходів до обробки просторової інформації з супутників для більш ефективної та оперативної оцінки стану рослинних покривів обумовлено зростаючою тенденцією доступності до даних дистанційного зондування Землі. У статті запропоновано інформаційну систему, яка дозволяє швидко та зручно відслідкувати зміни рослинного світу. Аналіз виконувався на прикладі Чорнобильської зони за період 2000-2020 років. Чорнобильська катастрофа співпала з періодом інтенсивного вегетаційного розвитку рослин. У цей період вони є найбільш чутливими до радіації. Було встановлено, що найчастіше для визначення кількісного стану біомаси застосовується індекс NDVI у різні часові інтервали. Але даний індекс стає не ефективним в періоди послаблення активної фази вегетації. У зв'язку з цим представляється практичний інтерес для оцінки можливості застосування методом К-середніх для аналізу космічних знімків рослинного покриву на різних фазах вегетації. В результаті дослідження коректно інтерпретовано водну поверхню, землі з рослинним покривом і без нього, завдяки чому визначено землі з розрідженою рослинністю та щільним рослинним покривом. Побудовано карти рослинного покриву за нормалізованим вегетаційним індексом за методом К-середніх, за яким можна чітко прослідкувати динаміку зміни рослинності протягом 20 років. Точність результатів була перевірена методом Байєса. Згідно проведених розрахунків визначено, що незважаючи на всі природні катаклізми (підвищення температури, засуха, зимові аномалії опадів та температур, буревії, лісові пожежі), а також людську діяльність (санітарні рубки, несанкціонована вирубка дерев), рослинність в Чорнобильській зоні продовжує рости і їхні площі зростатимуть, хоча і не так швидко.

**Ключові слова:** дистанційне зондування Землі; атмосферна корекція космічних знімків; Quantum GIS; нормалізований диференційний індекс рослинності; алгоритм К-Means; рослинність.

### Вступ

В сучасному інформаційному просторі особливе місце посідають геоінформаційні системи (ГІС), які є унікальним інструментом для створення, управління чи аналізу геопросторових даних в багатьох сферах людської діяльності. Геоінформаційні системи є інтеграцією електронного просторово-орієнтованого зображення (плани, схеми, карти) та бази даних в єдиному інформаційному середовищі [1, 2-5]. Вони є оптимальною платформою для розробки та прийняття системних рішень в сфері екології, в тому числі і для оцінки та аналізу стану рослинності, що зазнали негативного антропогенного та природного впливу. Однією з найбільших загроз, що спіткали Україну, стала аварія на Чорнобильській атомній електростанції (ЧАЕС) із загрозою надзвичайно тяжких наслідків, які ми маємо ще відслідковувати протягом тривалого часу. У зв'язку з цим, аналіз екологічних наслідків поблизу Чорнобиля має важливе наукове значення не лише для України, але і всього світу, і, особливо, сусідніх держав, які теж є постраждалими.

Чорнобильська катастрофа співпала з періодом інтенсивного вегетаційного розвитку рослин. У цей період вони є найбільш чутливими до радіації. У 1986-1988 рр. в 30-кілометровій зоні навколо Чорнобильської АЕС виявлено багато фактів радіаційного пошкодження рослин. Після аварії пошкоджені екосистеми відновлювалися десятиліттями. Таким чином, відбувалось «заселення» рослинних угруповань в колишні міста та села, а також на території сіль-

ськогосподарських угідь. Чорнобильська аварія показала, що великомасштабні викиди радіонуклідів в навколишнє середовище можуть мати серйозні наслідки для біоти, включаючи порушення в екосистемі.

Найбільшого забруднення радіоактивними речовинами зазнали саме природні екосистеми, а особливо ліси, які найважче піддаються стабілізації радіаційної ситуації і потенційно сприяють розповсюдженню радіонуклідів. Наслідком даної тенденції є висихання зелених насаджень на територіях в тисячі гектарів через вплив шкідників, пожежі, хвороби, зміни гідрологічного режиму. Не менш руйнівними та загрозливими є незаконні та самовільні вирубки. Зміна клімату, недбале ставлення і відсутність системи охорони призвели до виникнення неконтрольованих та катастрофічних пожеж [6]. За останнє десятиріччя відмічалися інтенсивні процеси заростання (заліснення) лук та перелогів Чорнобильської зони відчуження деревною рослинністю. Проте в квітні 2020 року було знищено понад 100 га лісу. Пожежа знищила рослинність, яка в Чорнобильській зоні виконує важливу бар'єрну функцію, запобігаючи ерозії ґрунтів.

Використання супутникових спостережень є одним з ефективних методів вивчення трансформації рослинності. Значення індексів рослинності тісно пов'язане з обсягом зеленої біомаси і служить основою для оцінки сезонної і багаторічної динаміки рослин. Таким чином, аналіз часових рядів просторових зображень став основою для створення інформаційної системи аналізу геоданих для відслідковування змін рослинності в Чорнобильській зоні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналізуючи науково-технічні та інші джерела інформації стосовно дослідження стану лісових насаджень на основі використання картографії, геоінформаційних систем, дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та комп'ютерних засобів, варто відзначити декілька методів класифікації космічних знімків: дешифрування (візуальна характеристика) та автоматична класифікація (контрольована та некерована класифікація). Найбільш перспективним є напрямок Барталева О.М. [7], роботи якого присвячені розробці методів оцінки стану і динаміці лісів на основі даних космічних спостережень. Особлива увага приділена методам контролю стану довкілля за допомогою систем дистанційного зондування, методам розпізнавання та обробці зображень, математичного моделювання, аналізу часових серій даних, математичній статистиці, геоінформації, системного та прикладного програмування. Просторово-часові методи досліджень лісових масивів на основі кореляційного синтезу ДЗЗ відображено в роботі Триснюка В.М. та Триснюка Т.В. [8]. Високі досягнення застосування ГІС технологій відмічені в галузі сільського господарства. Прогнозування врожайності, проведення моніторингу полів для визначення загроз стало доступним завдяки використанню супутникових даних. Датчики видають зображення в різних спектрах, що дає можливість застосування чисельних спектральних індексів, таких як нормалізований диференційований вегетаційний індекс (NDVI), індекс вмісту хлорофілу в покривах (CCCI), що врегульовує внесення поживних речовин, нормалізований індекс Red Edge (NDRE) визначає вміст азоту, модифікований ґрунтово-керований вегетаційний індекс (NSAVI) застосовується для мінімізації впливу ґрунтового фону на ранніх фазах розвитку рослин [9]. Серед сучасних досліджень варто відмітити роботи Поморцевої О. Є. з моделювання розташування екологічно небезпечних об'єктів за допомогою ГІС [10], Костюченко Ю.В., які в своїх працях зазначають високі перспективи використання ГІС-технологій в вивченні навколишнього середовища [11], Бурштинської Х., Долинської І. [12], Кохан С.С. [13-14] та зарубіжних вчених Grégoire J-M., Pinnock S [15], Jones P.D., Moberg A [16], C. Donald Ahrens [17] та інших.

В процесі роботи над системою відслідковування змін рослинності було досліджено ряд комп'ютерних платформ для аналізу та візуалізації природних змін.

Веб-додаток GIOVANNI, розроблений GES DISC, забезпечує простий та інтуїтивний спосіб візуалізації, аналізу та доступу до величезної кількості даних дистанційного зондування Землі без необхідності завантаження даних. Система дозволяє отримати доступ до даних з декількох віддалених сайтів, підтримує кілька форматів даних, включаючи ієрархічний формат.

Вчені з Університету Колорадо в США запустили проект «Земний архів» (The Earth Archive). Його метою є спроба оцифрування ландшафту Землі з використанням «лазерних карт», отриманих за допомогою лідарів.

Аналіз сучасних систем для відстеження змін в глобальній екосистемі дійшов висновку, що всі вони дають недостатню кількість інформації щодо аналізу та візуалізації даних про рослинність. Більшість з них має ряд недоліків:

- повна або обмежена функціональність для аналізу та візуалізації місцевих даних;
- незважаючи на наявність інструкцій щодо використання цих інструментів, існує високий поріг входу для використання програми, що значно скорочує кількість користувачів;
- обмежені можливості бачення мікрокліматичних показників.

Таким чином, актуальність роботи полягає у відсутності великої кількості аналогів, які можуть бути використані для отримання достатньої інформації про поточний та попередній стан лісових насаджень і проведення порівняльного аналізу відповідних показників з метою прогнозування подальшого стану.

Метою дослідження є розробка інформаційної системи аналізу геоданих для відслідковування змін рослинності Чорнобильської зони із застосуванням нормалізованого вегетаційного індексу рослинності (NDVI) та методу кластеризації K-середніх.

### Результати дослідження

Стрімкий розвиток сучасних засобів ДЗЗ значно розширив можливості отримання даних для аналізу змін рослинності на Землі. Передові технології дозволяють ефективно вирішувати завдання, пов'язані з отриманням якісно нової інформації, яка необхідна для сталого управління природною рослинністю та охороною природи.

Для вирішення поставлених завдань у дослідженні Чорнобильської зони була зібрана серія знімків супутникової програми Landsat 5 та 8 досліджуваної території за 2000-2020 роки. Для завантаження космічних знімків обрано відкритий електронний ресурс <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Специфікація для вибору знімків наведена в табл. 1.

Таблиця 1 – Специфікація для вибору знімків

Критерій	Необхідні дані
Координати	м. Чорнобиль (51°16'24" п. ш., 30°13'20" с. д.)
Дата зйомки	01.07.2000-08.31.2020 (липень-серпень)
Відсоток хмарності	Не більше 10 %
Рівень обробки	З проведеною геометричною корекцією
Формат отриманих даних	GeoTiff

Слід зауважити, що під час проведення аналізу за допомогою супутникових зображень хмарність була мінімальною. Усі сцени, записані для аналізу, характеризують стан рослинності в липні-серпні кожного досліджуваного року, оскільки саме в літній період рослинність знаходиться у фазі вегетації. Для дослідження використовуються зображення із середньою просторовою роздільною здатністю, але площа сцени значно більша, ніж досліджувана область, тому

всі досліджені зображення будуть «приспосовані» до потрібної області з відповідним географічним посиленням для подальшої роботи. Також проводиться синтезація каналів для формування відповідного мультиспектрального зображення, радіометрична та атмосферна корекція знімків в програмі QGIS 3.

Для оцінки кількості рослинності на основі багатоспектральних космічних знімків використовуються різні індекси рослинності: NDVI (нормалізований диференційний індекс рослинності), WdVI (зважений диференціальний індекс вегетації), PVI (вертикальний індекс вегетації) [18]. В нашому дослідженні ми використовуємо нормалізований індекс NDVI, який характеризує густоту рослинного покриття. NDVI – нормалізований диференційний показник вегетації – кількісний показник фотосинтетичних властивостей активної біомаси, що застосовується для вирішення задачі кількісної оцінки рослинності, показників біологічної продуктивності сільськогосподарських культур та кормових угідь.

Обчислюється NDVI за формулою

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

де NIR – амплітуда відбиття в ближній інфрачервоній області спектра, RED – амплітуда відбиття в червоній області спектра.

Завдяки використанню при розрахунках NDVI нормалізованої різниці між мінімумом і максимумом відбиття забезпечується зниження різних форм мультиплікативного шуму (різниця в освітленні знімка, хмарності, серпанку, поглинання радіації атмосферою), наявного у спектральних каналах різночасових знімків. У проведеному дослідженні враховано особливості NDVI, пов'язану з помірною чутливістю до зміни ґрунтового фону (за винятком випадків, коли густина рослинного покриття була нижчою за 30 %).

Розрахунок NDVI базується на двох найбільш стабільних областях (незалежно від інших факторів) спектральної кривої відбиття судинних рослин. NDVI можна обчислити із зображень високої, середньої або низької роздільної здатності зі спектральними каналами в червоному діапазоні (0,55-0,75 мкм) та інфрачервоним (0,75-1,0 мкм).

Відповідно до формули (1.1), щільність рослинності (NDVI) у певний момент зображення дорівнює різниці між інтенсивністю відбитого світла в інфрачервоній та червоній зонах, поділеною на суму їх інтенсивності. Максимальне поглинання сонячної радіації хлорофілом вищих судинних рослин знаходиться в червоній зоні спектру (0,6-0,7 мкм), а область максимального відбиття структур клітин знаходиться в інфрачервоній зоні (0,7-1,0 мкм).

У даній роботі використовуються знімки супутників Landsat 5 з параметрами каналів:

3 (червоний, 0,63 – 0,69 мкм),

4 (ближній інфрачервоний, 0,76-0,90 мкм)

та Landsat 8 з параметрами каналів

4 (червоний, 0,64 – 0,67 мкм),

5 (ближній інфрачервоний, 0,85-0,88 мкм).

Під час роботи додатку обчислюється значення яскравості кожного пікселя вхідних зображень у видимому червоному та ближньому інфрачервоному каналах шляхом комбінації значень червоного, зеленого та синього кольору.

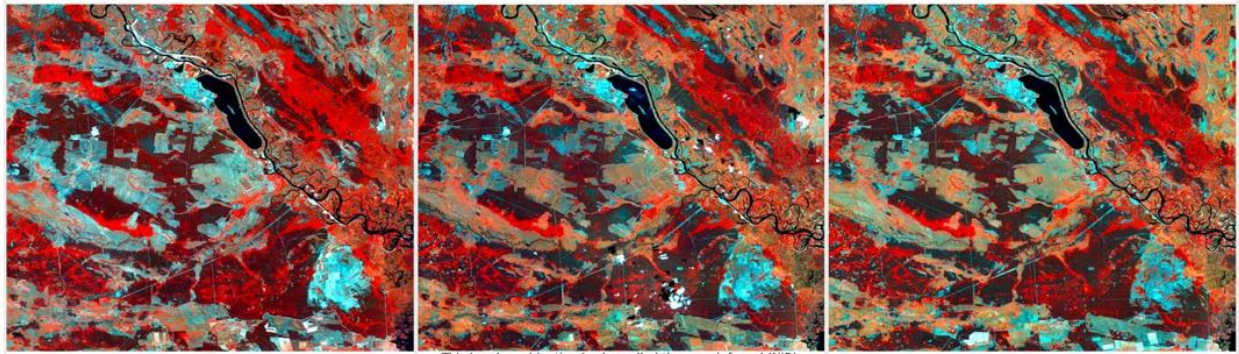
На рис. 1 зображено один і той самий фрагмент ділянки поверхні в різні роки (2000, 2010, 2020). Натуральний кольоровий композит використовує смугову комбінацію червоного, зеленого та синього. Він відтворюється близько до того, що бачить наше людське око. У той час як здорова рослинність зелена, нездорова – коричнева. Міські об'єкти виглядають білими та сірими, а вода – темно-синьою або чорною.

На рис. 2 зображені знімки в інфрачервоному спектрі. Ця комбінація смуг також називається композитом ближнього інфрачервоного. Він використовує ближній інфрачервоний та зелений. Оскільки хлорофіл відображається поблизу інфрачервоного світла, то ця смугова композиція корисна для аналізу рослинності. Зокрема, червоні ділянки мають кращий стан рослинності. Темні ділянки – вода, а міські – білі.

Через особливості відображення в різних областях червоного та інфрачервоного спектрів природні об'єкти, не пов'язані з рослинністю, мають постійне значення NDVI. У табл. 2 наведена шкала NDVI, в якій зазначається, що кожне значення NDVI відповідає різним об'єктам на землі.



**Рис. 1.** Знімки в «натуральних» кольорах Чорнобильської зони за 2000, 2010 та 2020 роки відповідно  
(**Fig. 1.** Images in the natural colors of the Chernobyl zone for 2000, 2010 and 2020 respectively)



**Рис. 2.** Знімки в інфрачервоному спектрі Чорнобильської зони за 2000, 2010 та 2020 роки відповідно (Fig. 2. Images in the infrared spectrum of the Chernobyl zone for 2000, 2010 and 2020 respectively)

Таблиця 2 – Шкала NDVI

Тип об'єкта	Відбиття в червоній області спектра	Відбиття в інфрачервоній області спектра	Значення NDVI
Густа рослинність	0.1	0.5	0.7
Розріджена рослинність	0.1	0.3	0.5
Відкритий ґрунт	0.25	0.3	0.025
Хмари	0.25	0.25	0
Сніг і лід	0.375	0.35	-0.05
Вода	0.02	0.01	-0.25
Штучні матеріали (бетон, асфальт)	0.3	0.1	-0.5

За цими значеннями обчислюється значення NDVI для кожного пікселя в межах від -1 до 1, рис. 3:

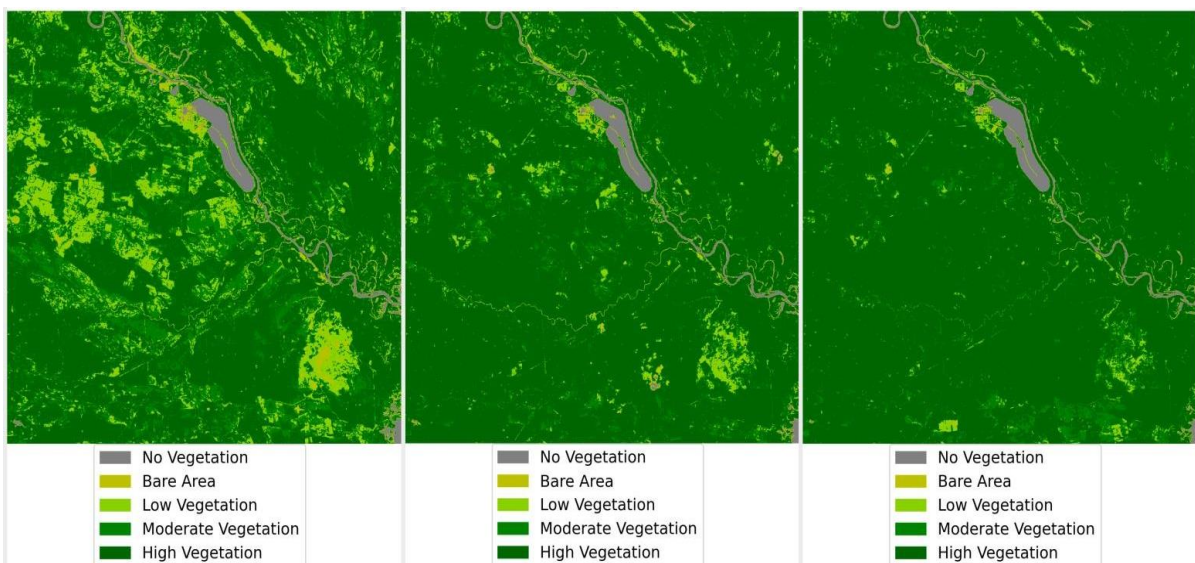
- -1.0-0 – відмерлі рослини, об'єкти неживої природи, вода;
- 0-0.16 – відкритий ґрунт;
- 0.17-0.40 – трав'яна рослинність;
- 0.41-0.60 – розріджена рослинність;
- 0.61-0.70 – густа рослинність;
- 0.71-1.0 – дуже густа рослинність.



**Рис. 3.** Дискретизована шкала NDVI (Fig. 3. Discretized scale NDVI)

Проблема відображення даних розв'язана через надання кожному відповідному пікселю вхідного зображення відповідного кольору, отриманого завдяки конвертації значення NDVI даного пікселя. Оцінюючи поверхню NDVI за 2020 рік, встановлено, що частка дуже густої рослинності набагато більша, ніж за попередні роки, відкритого ґрунту майже немає. На основі аналізу даних нормалізованого вегетаційного індексу за досліджений період побудовано карти змін щільності рослинного покриву за 2000, 2010, 2020 роки.

Результати моделювання, що приведені на рис. 4, наочно вказують на зміни, які відбулися на відповідних ділянках.



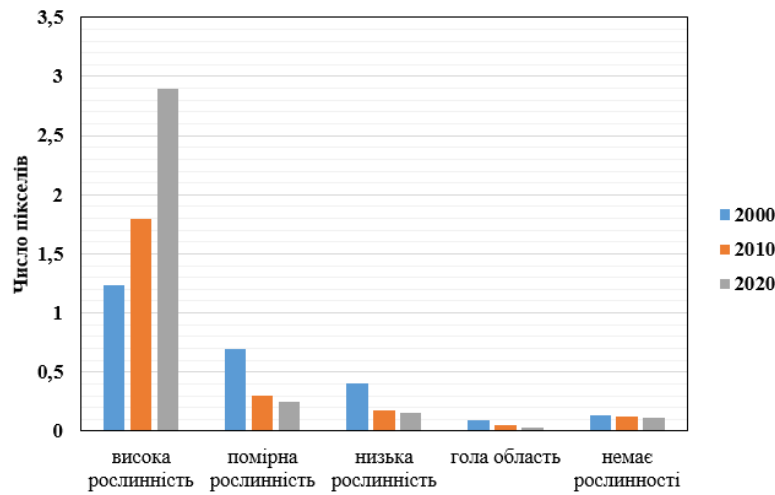
**Рис. 4.** Класифікація знімків Чорнобильської зони відчуження за розрахованими індексами вегетації за 2000, 2010 та 2020 роки відповідно (Fig. 4. Classification of images of the Chernobyl zone according to the calculated vegetation index according to 2000, 2010 and 2020 respectively)

Для визначення кількісних коливань у часі територій, на яких змінюється щільність рослинного покриття, пораховано кількість пікселів для кожного з розрахованих значень показника NDVI. За результатами класифікації на рис. 5 представлено діаграму кількісного порівняння рослинності.

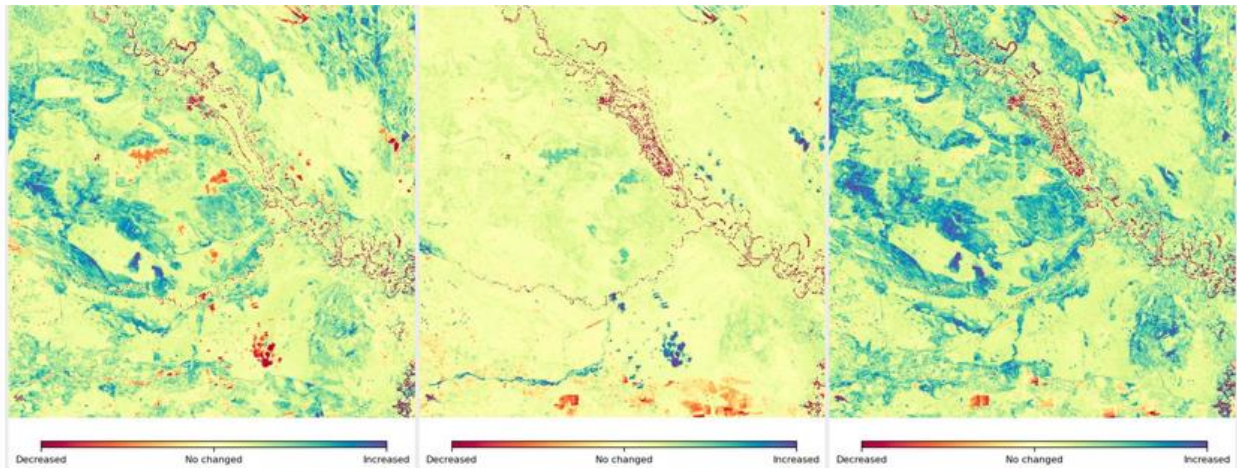
Використання методу індексу рослинності дає змогу на підставі зміненого спектрального образу більш ефективно інтерпретувати об'єкти поверхні в Чорнобильській зоні.

Якість рослинного покриття за багатоспектральними космічними зображеннями оцінюється за вмістом важливих для життєдіяльності пігментів, та базується на аналізі спектральних характеристик відбиття живого листя рослин у видимому та ближньому інф-

рачервоному спектральних діапазонах. Оцінки, отримані за допомогою індексу NDVI, містять найбільш детальну інформацію про розподіл і різноманітність рослинного світу, визначення ділянок, на яких існують відхилення в рості і розвитку рослин. На рис. 6 показано проходження змін рослинного покриття за показниками вегетаційного індексу. Дані зображення свідчать, що в останні роки на території відчуження проходять суттєві зміни в рослинному покритті. Йде інтенсивне заростання лук та перелогів Чорнобильської зони деревною рослинністю (вже більше 50 %). Проте площі лісів поступово зменшуються. Це відбувається завдяки підтопленням, радіаційному ураженню, пожежам. Суттєвої шкоди лісу також завдають природні шкідники та хвороби.



**Рис. 5.** Діаграма кількісного порівняння класів за розрахованим індексом вегетації за роками  
(**Fig. 5.** Diagram of quantitative comparison of classes according to the calculated vegetation index by years)



**Рис. 6.** Відображення змін рослинності Чорнобильської зони за 2000, 2010 та 2020 роки відповідно  
(**Fig. 6.** Reflection of changes in the vegetation of the Chernobyl zone for 2000, 2010 and 2020 respectively)

Класифікація за даним індексом вегетації не несе вичерпної інформації про інші об'єкти на поверхні досліджуваної області, наприклад, вода, ліси. Також індекс NDVI у значній мірі залежить від кількості активної біомаси, тобто він стає неефективним в періоди, коли рослинність є послабленою або спостерігається низький рівень вегетації. У зв'язку з цим найбільш поширеним і використовуваним методом дешифрування космічних знімків є візуальне дешифрування знімка,

при якому розшифровку проводить експерт, який знає характеристики області та властивості об'єктів, представлених на зображенні [19]. Однак цей метод трудомісткий і досить тривалий, тому важливо дослідити методи автоматичного дешифрування (класифікації). Автоматична класифікація – це процес розбиття пікселів неперервного растрового зображення на категорії на основі їх спектральних значень, в результаті чого кожному пікселю присвоюється нове значення.

Оскільки апріорної інформації про об'єкт зйомки у нас немає, ми будемо використовувати *некеровану класифікацію* (кластеризація). Дана класифікація дозволяє виділити контури з неконтрастною структурою по спектральній яскравості – рослини, воду, хмари та інші об'єкти, розбивши зображення на групи пікселів, подібних за спектральними властивостями, тобто кластери. Зауважимо, що даний алгоритм потребує мінімум вхідних даних. Найбільш популярними методом кластеризації є алгоритми К-середніх [20], який розділяє  $n$  об'єктів на  $k$  кластерів, так щоб кожний об'єкт належав до кластера з найближчим до нього середнім значенням. За допомогою цього методу ми визначаємо породний склад дерев з наших знімків.

*Кластеризація методом К-середніх (K-means)* – це неконтрольований алгоритм машинного навчання, який використовується для поділу заданого набору  $D$ , що містить  $n$  об'єктів, на  $k$  різних кластерів  $C_1, C_2, \dots, C_k$ , що не перекриваються. Даний метод простий в реалізації та відносно швидкий. Об'єктивна функція використовується для оцінки якості розподілу, щоб об'єкти в кластері були схожими один на одного, але відрізнялися від об'єктів в інших кластерах. Це означає, що цільова функція спрямована на високу схожість у кластері та низьку схожість між кластерами.

Спочатку визначається кількість кластерів, що необхідно утворити. Потім набір даних  $D$  з  $n$  об'єктів розбивається на  $k$  кластерів так, щоб кожний об'єкт належав до кластеру з найближчим до нього середнім значенням  $c_i$  – центроїдом кластеру  $C_i$ .

Метод базується на мінімізації суми квадратів відстаней між кожним об'єктом та центром його кластера. Різниця між об'єктом  $p$  кластеру  $C_i$  і  $c_i$  вимірюється за допомогою метрики  $d = dist(p, c_i)$ , де  $dist(x, y)$  – евклідова відстань між двома точками  $x$  і  $y$ . Цільова функція обчислюється за формулою:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{p \in C_i} (p - c_i)^2, \quad (2)$$

де  $E$  – сума помилки у квадраті для всіх об'єктів у наборі даних,  $k$  – число кластерів,  $C_i$  – отримані кластери,  $p$  – точка в просторі, що представляє даний об'єкт,  $c_i$  – центроїд кластеру  $C_i$ .

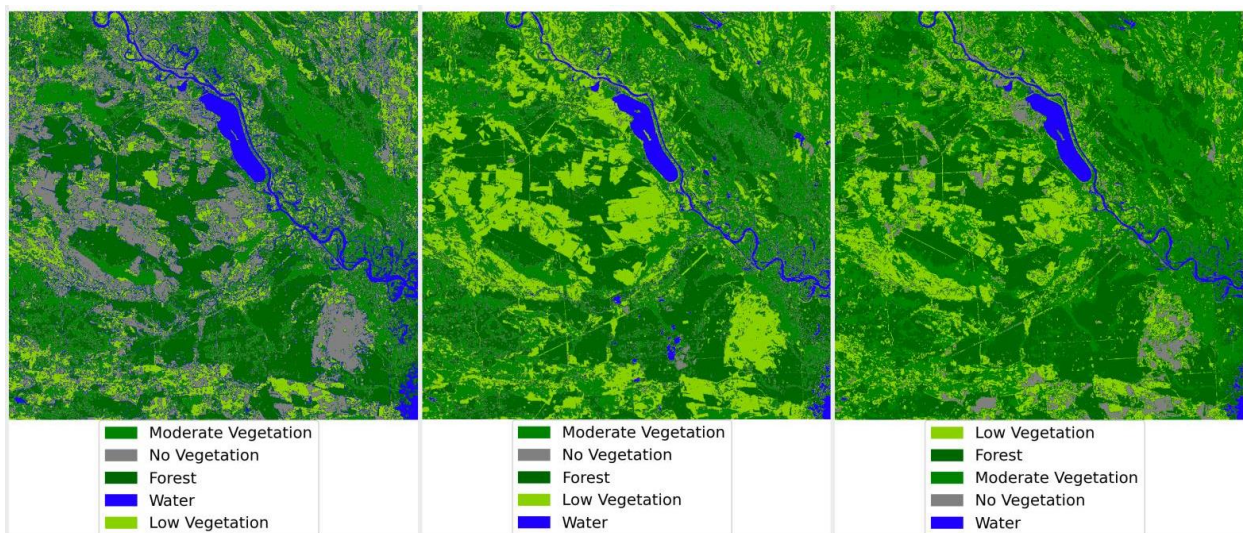
Об'єкт до його кластерного центру розміщується в квадраті, а відстані підсумовуються. Ця цільова функція намагається зробити отримані  $k$  кластери максимально компактними та максимально відокремленими.

#### Алгоритм К-середніх:

1. Визначається кількість кластерів, що необхідно утворити.
2. Випадковим чином обирається  $k$  об'єктів, які на цьому кроці вважаються центрами кластерів.
3. Кожний об'єкт «приписується» до одного з  $n$  кластерів – того, відстань до якого найкоротша.
4. Розраховується новий центр кожного кластера як елемент, ознаки якого розраховуються як середнє арифметичне ознак об'єктів, що входять у цей кластер.
5. Ітерації продовжуються до того часу (повторюються попередні кроки 3-4), поки кластерні центри стануть стійкими, дисперсія всередині кластера буде мінімізована, а між кластерами – максимізована.

Обчислювальна складність алгоритму К-середніх дорівнює  $O(nkt)$ , де  $n$  – загальна кількість об'єктів,  $k$  – кількість кластерів,  $t$  – кількість ітерацій. Зазвичай  $k \ll n$  і  $t \ll n$ . Тому метод є порівняно масштабованим та ефективним при обробці великих наборів даних.

На рис.7 зображено класифікацію знімків, за якими можна виявити змін в її структурі досліджуваної поверхні, а також для відокремлення рослинності від інших об'єктів та встановлення пікселів відкритого ґрунту.

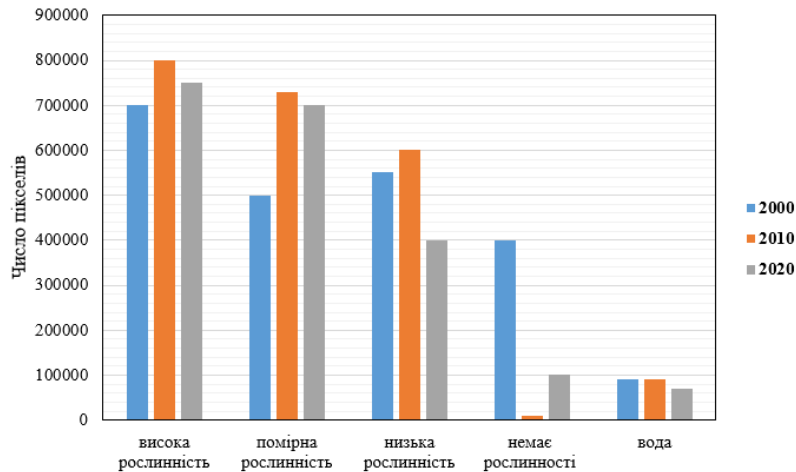


**Рис. 7.** Класифікація знімків Чорнобильської зони відчуження за допомогою методу К-середніх за 2000, 2010 та 2020 роки відповідно (**Fig. 7.** Classification of images of the Chernobyl zone using the method of K-means for 2000, 2010 and 2020 respectively)

За результатами класифікації на рис. 8 представлено діаграму кількісного порівняння рослинності за 2000, 2010, 2020 роки з використанням методу К-середніх.

Згідно результатів, наведених на рис. 7, 8, найбільшу частину у Чорнобильській зоні складають ліси, площа яких займає 62 % від усієї площі. На рис.8 видно, що з 2000 року по 2010 рік площа лісів

зросла приблизно на 15 %, а в період з 2010 року по 2020 року навпаки трохи зменшилася – приблизно на 5 %. Це пояснюється тим, що в 2015 році та в 2020 році територією відчуження пройшли великі лісові пожежі, причинами яких стали висока температура, зменшення кількості опадів, сильні поривчасті вітри, і, відповідно, масове ураження дерев шкідниками й хворобами.



**Рис. 8.** Діаграма кількісного порівняння класів за 2000, 2010, 2020 роки з використанням методу К-середніх (Fig. 8. Diagram of quantitative comparison of classes for 2000, 2010 and 2020 years using the method of K-means)

Це все призводить до того, що ліс швидко відновитися не може, тому й кількісні показники заліснення території останніми роками впали. Чорнобильська зона відчуження має площу 260 тис. га. Наприклад, в 2015 році площа лісової пожежі досягла майже 400 га. В 2020 році внаслідок квітневої пожежі загалом згоріло 11500 га лісу, що становить 5 % всієї території, з них приблизно 35 % – ліси. Внаслідок інтенсивного горіння були втрачені або сильно пошкоджені певні рослинні групи. Проте, незважаючи на всі природні катаклізми (підвищення температури, засуха, зимові аномалії опадів та температур, буревії, лісові пожежі), а також людську діяльність (санітарні рубки, несанкціонована вирубка дерев), ліси продовжують рости і їх площі зростатимуть, хоча і не так швидко.

Перевіримо отримані результати про залісненість території Чорнобильської зони з використанням відомої формули Байєса:

$$P(B|A) = \frac{P(A|B) \cdot P(B)}{P(A)}, \quad (3)$$

де  $P(B)$  – априорна ймовірність події  $B$ ,  $P(A)$  – ймовірність настання події  $A$ ,  $P(A|B)$  – ймовірність настання події  $A$  при істинності гіпотези  $B$  (умовна ймовірність),  $P(B|A)$  – ймовірність гіпотези  $B$  за умови, що подія  $A$  вже настала (апостеріорна ймовірність).

Застосуємо формулу (3) для нашого випадку:

$$P(\text{ліс} \setminus \text{пож.}) = \frac{P(\text{пож.} \setminus \text{ліс}) \cdot P(\text{ліс})}{P(\text{пож.})} = \frac{P(\text{пожежі} \setminus \text{ліс}) \cdot P(\text{ліс})}{P(\text{пож.} \setminus \text{ліс}) \cdot P(\text{ліс}) + P(\text{пож.} \setminus \neg \text{ліс}) \cdot P(\neg \text{ліс})}, \quad (4)$$

де  $P(\text{пож.} \setminus \text{ліс})$  – ймовірність настання пожежі в лісі,  $P(\text{пож.} \setminus \neg \text{ліс})$  – ймовірність настання пожежі за межами лісу,  $P(\neg \text{ліс})$  – ймовірність того, що на даній території лісу немає,  $P(\text{ліс} \setminus \text{пож.})$  – ймовірність появи лісу при умові, що пожежа пройшла.

Підрахувавши площі територій, де були пожежі та лісові пожежі за період 2015-2020 років, ми за формулою (4) отримуємо, що заліснення території Чорнобильської зони має становити 70 % при ймовірності негоди 10 % за останні роки.

Порівнюючи отримані результати з тими, які ми мали б отримати теоретично, можемо зробити висновок, програмне забезпечення може давати похибку через некоректну класифікацію та невірні дані, адже ми не маємо можливості використати зображення 100 % якості, особливо, коли такі космічні знімки наразі платні.

Відповідно, якщо покращити алгоритм класифікації та працювати зі знімками вищої якості, то програма буде давати більш точніші результати.

## Висновки

У статті розроблено інформаційну систему аналізу часових змін рослинності протягом десятиліть. Проаналізовано результати визначень нормалізованого вегетаційного індексу рослинності NDVI та за серією космічних знімків TM Landsat 5 та 8 протягом літнього періоду за 2000, 2010, 2020 роки для Чорнобильської зони відчуження.

Також встановлено ефективність використання методу К-середніх для оцінки зміни рослинності на даній території.



Для перевірки точності отриманих результатів використовувався метод Байєса, який довів нам, що дані методи є досить ефективними для аналізу динаміки стану рослинних угруповань в часі і дозволяють виявити загальні тенденції позитивної-негативної зміни рослинного покриву на досліджуваній території.

Даний програмний продукт є досить гнучким та універсальним, він може бути легко адаптованим для застосування не тільки для оцінки стану рослинного

покриву Чорнобильської зони, але і для інших територій із обмеженим доступом.

Подальшим напрямком вдосконалення розробленої інформаційної системи є впровадження штучного інтелекту, що надало б можливості більш ефективно та точно робити аналіз та оцінку класифікації, а також подальше вдосконалення й самостійна розробка алгоритму класифікації зображень без додаткових програмних застосунків.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ (REFERENCES)

1. Michael N. DeMers. *Fundamental of geographic information systems*. New Mexico State University. 2010. 506 p.
2. Бутенко О.С., Барабаш О.В., Горелик С.І., Никітін А.А. Система космічного моніторингу за сміттєзвалищами твердих побутових відходів [Space monitoring system for landfill for operational detection of unauthorized landfills]. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Випуск 2 (48). Полтава: ПНТУ, 2018. С. 114-119. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.2.114>.
3. Бутко І.М. Інформаційна технологія використання геопросторових інформаційних структур [Information technology of using geospatial information structures]. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Випуск 2 (64). Полтава, ПНТУ, 2021. С. 4-10. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.2.004>.
4. 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., Kasprzyk 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)
5. Коваленко А.А., Кучук Г.А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування [Methods for synthesis of informational and technical structures of critical application object's control system]. *Сучасні інформаційні системи [Advanced Information Systems]*. Т. 2, № 1. 2018. С. 22-27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
6. 30 років Чорнобильської катастрофи [30 years of the Chernobyl disaster]. Огляди. Збірник інформаційно-аналітичних доповідей. К.: КІМ, 2016. 170 с.
7. Bartalev S., Isaev A. Monitoring Northern Eurasian Terrestrial Ecosystems from Satellites: New Products and Perspective Approaches. *31st ISRSE Conference on Global Monitoring for Sustainability and Security*. St Petersburg, 2012.
8. Триснюк В.М., Охарев В.О., Триснюк Т.В. Створення системи мобільного екологічного моніторингу [Creating a system of mobile environmental monitoring]. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. № 2. 2018. С. 116-123.
9. IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC special report on land use, land use change and forestry. Cambridge University Press, 2012.
10. Поморцева О.Є. Моделювання розташування екологічно небезпечних об'єктів за допомогою геоінформаційних систем [Modeling the location of environmentally hazardous objects using geographic information systems]. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Т. 29(68), № 6, Ч.2. 2018. С. 222-226.
11. Костюченко Ю. В., Мовчан Д. М., Костюченко Ю. В., Артеменко І. Г., Білоус Ю. Г. Оцінка невизначеностей при визначенні продуктивності рослинного покриву та формуванні вуглецевого балансу територій за даними ДЗЗ [Estimation of uncertainties in determining the productivity of vegetation and the formation of the carbon balance of the territories according to remote sensing of the Earth]. *Геоінформатика*, № 3 (47). 2013. С. 67-75.
12. Буруштинська Х., Долинська І. Врахування впливу атмосфери під час опрацювання космічних зображень [Taking into account the influence of the atmosphere during the processing of space images]. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. Вип. 76. 2012. С. 70-73.
13. Кохан С.С. Дослідження динаміки вегетаційних індексів для оцінювання стану сільськогосподарських культур на основі даних IRS-1D LISS-III [Study of the dynamics of vegetation indices for assessing the condition of crops on the basis of data IRS-1D LISS-III]. *Вісник геодезії та картографії*. № 4(73). 2011. С. 20-24.
14. Кохан С.С. Застосування вегетаційних індексів на основі серії космічних знімків IRS-1D LISS-III для визначення стану посівів сільськогосподарських культур [Application of vegetation indices based on a series of space images IRS-1D LISS-III to determine the status of crops]. *Космічна наука і технологія*. Т. 17, № 5. 2011. С. 58.
15. Grégoire J.-M., Pinnock S. The World Fire Web network. A satellite based system for globally mapping fires in vegetation. *Publication of the European Communities*, S.P.I.00.11 2010. P. 6.
16. Jones P.D., Moberg A. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2001. *Journal of Climate*. 16. 2003. P. 206-223.
17. Donald C. Ahrens. *Meteorology Today*. Cengage Learning, 2016. 662 p.
18. Бардиш Б., Буруштинська Х. Використання вегетаційних індексів для ідентифікації об'єктів земної поверхні [Use of vegetation indices to identify objects on the earth's surface]. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. № 2 (28). 2014. С. 82-88.
19. Омелич І.Ю., Яременко А.А., Непошивайленко Н.О., Горай І.В. Визначення тенденцій розвитку рослинного покриву на підставі розрахунку нормалізованого вегетаційного індексу на прикладі Петриківського району Дніпропетровської області [Determination of trends in the development of vegetation on the basis of the calculation of the normalized vegetation index on the example of Petrykivskiy district of Dnipropetrovsk region]. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. Вип. 23, 2019. С. 9-13.
20. Coates A., Ng A. Y. *Learning Feature Representations with K-means*, Stanford University, 2012.

Received (Надійшла) 11.08.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.10.2021

**Барабаш Олег Володимирович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «КПІ імені І. Сікорського», Київ, Україна;  
**Oleg Barabash** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky KPI”, Kyiv, Ukraine;  
e-mail: [bar64@ukr.net](mailto:bar64@ukr.net); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1715-0761>.

**Бандурка Олена Іванівна** – аспірантка кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;  
**Olena Bandurka** – Phd student of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky KPI”, Kyiv, Ukraine;  
e-mail: [o.i.bandurka@ukr.net](mailto:o.i.bandurka@ukr.net); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8059-1861>.

**Шпурик Вадим Вадимович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;  
**Vadim Shpuryk** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky KPI”, Kyiv, Ukraine;  
e-mail: [wadimoff@gmail.com](mailto:wadimoff@gmail.com); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3477-5731>.

**Свинчук Ольга Василівна** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;  
**Olha Svychnuk** – Candidate of Physic-Mathematical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky KPI”, Kyiv, Ukraine;  
e-mail: [7011990@ukr.net](mailto:7011990@ukr.net); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9032-6335>.

### Информационная система анализа геоданных для исследования изменений растительности

О. В. Барабаш, Е. И. Бандурка, В. В. Шпурик, О. В. Свинчук

**Аннотация.** Быстрый рост возможностей геоинформационных технологий в области обработки и анализа пространственных данных привел к существенному росту роли геоинформационных систем в разных областях человеческой деятельности. Применение новых подходов к обработке пространственной информации со спутников для более эффективной и оперативной оценки состояния растительных покровов обусловлено растущей тенденцией доступности данных дистанционного зондирования Земли. В статье предложена информационная система, которая позволяет быстро и удобно отслеживать изменения растительного мира. Анализ проводился на примере Чернобыльской зоны за период 2000-2020 годов. Чернобыльская катастрофа совпала с периодом интенсивного вегетационного развития растений. В этот период они наиболее чувствительны к радиации. Было установлено, что наиболее часто для определения количественного состояния биомассы применяется индекс NDVI в разные временные интервалы. Но данный индекс становится неэффективным в периоды ослабления активной фазы вегетации. В этой связи представляется практический интерес для оценки возможности применения методом К-средних для анализа космических снимков растительного покрова на разных фазах вегетации. В результате исследования корректно интерпретирована водная поверхность, земли с растительным покровом и без него, благодаря чему определены земли с разреженной растительностью и плотным растительным покровом. Построены карты растительного покрова по нормализованному вегетационному индексу методом К-средних, по которому можно четко проследить динамику изменения растительности в течение 20 лет. Точность результатов была проверена методом Байеса. Согласно проведенным расчетам определено, что несмотря на все природные катаклизмы (повышение температуры, засуха, зимние аномалии осадков и температур, ураганы, лесные пожары), а также человеческую деятельность (санитарные рубки, несанкционированная вырубка деревьев), растительность в Чернобыльской зоне продолжает расти и ее площади будут расти, хотя и не так быстро.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли; атмосферная коррекция космических снимков; Quantum GIS; нормализованный дифференциальный индекс растительности; алгоритм K-Means; растительность.

### Information system of analysis of geodata for tracking changes of vegetation

Oleg Barabash, Olena Bandurka, Vadim Shpuryk, Olha Svychnuk

**Abstract.** The rapid growth of geo-information technology capabilities in the field of spatial data processing and analysis has led to a significant growth of the role of geo-information systems in different areas of human activity. Application of approaches to spatial information processing from satellites new for more effective and efficient assessment of the state of plant cover is caused by growing tendency of availability to data of Earth remote sensing. The article offers an information system that allows to quickly and conveniently track changes in the vegetation. The analysis was carried out on the example of the Chernobyl Area between 2000 and 2020. The Chernobyl Disaster coincides with the period of intensive vegetative plant development. During that period, they are most sensitive to radiation. It has been established that for defining the quantitative state of biomass the NDVI index at different time intervals is most often used. But this index becomes ineffective during periods of weakening of active phase of vegetation. This is therefore of practical interest to assess the possibility of using the K-means clustering for the analysis of space images of vegetation cover at different phases of vegetation. As a result of the research, water surface, land with and without vegetation has been correctly interpreted, thus determining the land with a sparse vegetation and dense vegetation cover. The maps of the vegetation cover according to the normalized vegetative index using the K-medium method were constructed, the method by which changes in vegetation over 20 years can be clearly observed. The accuracy results were verified with the Common Method Bias. According to the calculations, despite all natural cataclysms (temperature increase, drought, winter anomalies of precipitations and temperatures, storms, forest fires), as well as human activity (sanitary clear cuttings, illegal logging), vegetation in the Chernobyl zone continues to grow and its areas will increase, although not so quickly.

**Keywords:** Remote Earth sensing; atmospheric correction of space images; Quantum GIS; normalized differential vegetation index; K-means algorithm; vegetation.

Д. Г. Волошин, В. О. Бречко, С. Г. Семенов

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

## МЕТОД КОМПОЗИЦІЇ МАРШРУТУ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ У ПРОСТОРІ

**Анотація.** Стаття присвячена розробці методу композиції маршруту безпілотного літального апарату у тривимірному просторі. Основною відмінністю представленого методу є комплексне врахування особливостей навколишнього середовища, що відображає можливі перешкоди (активні або пасивні) та інші обмеження задачі при композиції маршруту безпілотного літального апарату в тривимірному просторі. Це дозволило підвищити безпеку виконання завдання у автономних умовах польоту. У статті проведено аналіз основних підходів композиції маршрутів безпілотного літального апарату у просторі. Зроблено висновок про недоліки двовимірного уявлення. У методі представлено чотири етапи виконання завдання. Це етап моделювання навколишнього середовища, що відображає можливі перешкоди (активні чи пасивні) та інші обмеження завдання. Етап побудови розширеного графу маршрутів пересування безпілотного літального апарату у просторі. Відмінністю цього етапу є адаптивне врахування просторового розташування активних перешкод у просторі. Наступний етап це етап пошуку маршруту, що з'єднує стартову точку з кінцевою і обходить всі перешкоди та дає можливість побудови початкового маршруту у вигляді ламаної лінії, яка формується послідовністю шляхових точок, і з'єднує стартову точку з кінцевою, міняючи перешкоди. Останнім є етап отримання кінцевого результату, який забезпечується згладжуванням отриманої ламаної лінії. У цій частині методу композиції для вирішення задачі згладжування траєкторії руху безпілотного літального апарату у просторі на обраному маршруті доведено доцільність використання методу нерівномірного кубічного B-сплайну. За допомогою цього методу поставлено та вирішено завдання вибору та оптимізації параметра згладжування.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат; імітаційна модель; безпека; траєкторія польоту.

### Вступ

У сучасному світі безліч завдань цивільного та військового призначення вирішуються з безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Це дозволяє підвищити ефективність вирішення задач. Один з найважливіших завдань у практиці застосування БПЛА є побудовою маршруту переміщення. Особливо актуальною ця задача стає в умовах зовнішніх деструктивних дій при переході в автономний режим польоту. Завдання ускладнюється необхідністю врахування множини факторів, пов'язаних з активними та пасивними перешкодами, складністю ландшафтної складової та жорсткими вимогами до часових та ймовірнісних показників цільового використання БПЛА. Тому розробка методу композиції маршруту БПЛА у просторі з урахуванням особливостей навколишнього середовища та зовнішніх факторів – актуальна задача.

**Аналіз літературних даних.** Аналіз літератури показав, що композиції маршруту БПЛА у просторі в складній екологічній обстановці присвячено ряд робіт [1-3]. Серед них можна виділити підхід, заснований на теорії графів [1]. Основним достоїнством цієї розробки є простота і ясність реалізації, однак ефективність використання цієї розробки на практиці знижується необхідністю врахування багатьох факторів впливу та великими часовими витратами на побудову маршрутів.

Також існує ряд розробок пов'язаних з використанням методів штучного інтелекту. Серед них можна виділити роботу [2]. Однак, використання запропонованих у цій роботі підходів, для вирішення всіх завдань композиції маршрутів, також вимагає великих обчислювальних та часових витрат.

Можна відзначити роботи в яких детально описані методи планування шляху в двовимірному просторі.

Ці методи будуються на основі графів і дерев [3, 4], біологічного інтелекту [5, 6], потенційних полів [7, 8] і т.і. Однак композиція маршруту у трьохвимірному просторі є більш складною задачею, що вимагає додаткових досліджень.

### 1. Розроблення методу композиції маршруту БПЛА у просторі

Проведені дослідження показали, що композиція маршруту є комплексною задачею, в якій маршрут від початкової точки до кінцевої точки прокладається з урахуванням низки обмежень, що забезпечують обхід перешкод. На відміну від композиції маршруту у двовимірному просторі, композиція у трьох вимірах є складнішою. Це пов'язано з тим, що у тривимірному випадку моделювання навколишнього простору, пошук оптимального шляху, а також безпосередньо композиція маршруту виконуються з урахуванням тривимірних перешкод, які можуть бути активними (наприклад, засоби протиповітряної оборони), і пасивними (елементи ландшафту). Це потребує великих обчислювальних ресурсів.

У процесі розв'язання задачі композиції маршруту можна виділити чотири етапи.

На першому етапі необхідно провести моделювання навколишнього середовища, що відображає можливі перешкоди (активні чи пасивні) та інші обмеження завдання. На другому етапі будується розширений граф маршрутів пересування БПЛА у просторі (дорожня карта маршрутів).

На третьому етапі, виходячи з моделі навколишнього середовища, проводиться пошук маршруту, що з'єднує стартову точку з кінцевою і обходить всі перешкоди. Це дає можливість побудови початкового маршруту у вигляді ламаної лінії, яка формується послідовністю шляхових точок, і з'єднує стартову точку з кінцевою, міняючи перешкоди.

На четвертому етапі, для отримання остаточного результату, виконується процес згладжування отриманої ламаної лінії.

### 1.1 Модель навколишнього середовища

З низки джерел [9, 10, 11] відомо, що в даний час існує кілька основних принципів представлення даних для зберігання інформації про ландшафти.

Перший – використання регулярної сітки висот (або інша назва – Карта Висот – HeightMap) [9].

Другий – використання іррегулярної сітки вершин і зв'язків, що їх з'єднують (тобто зберігання простої триангульованої карти) [10].

Третій – зберігання карти ландшафту, але в даному випадку зберігаються не конкретні висоти, а інформація про використаний блок. І тут створюється кілька заздалегідь побудованих сегментів, але в карті вказуються лише індекси цих сегментів [11].

Проведені дослідження представлених принципів дозволили виявити їх основні переваги та недоліки. Так, серед переваг методів карти висот можна виділити таке:

- наочність, у будь-якій програмі перегляду графічних файлів можна відразу побачити всю інформацію;

- можливість зберігання відомостей не лише про висоту, а й про інші особливості ландшафту;

- легкість знаходження координат та ін.

У свою чергу використання іррегулярної сітки вершин та зв'язків у порівнянні з методами карти висот використовується значно менше інформації для побудови ландшафту. Необхідно зберігати значення висот кожної вершини і зв'язки, що ці вершини з'єднують. Це дає вигоду у швидкості при передачі величезних масивів інформації по AGP, у процесі візуалізації ландшафту.

У третьому з наведених способів також використовуються карти висот. Тільки замість висот у ній зберігаються індекси ландшафтних сегментів. Як ці сегменти представлені, в принципі, не грає ролі. Вони можуть бути і регулярними, і іррегулярними (причому можна використовувати ті й інші одночасно). Це дає такі переваги:

- можливість представлення величезних відкритих просторів;

- крім самих ландшафтів у таких блоках можна зберігати й інформацію про будинки, будівлі, рослини, специфічні ландшафтні рішення (наприклад, печери або скелі, що нависають один над одним);

- можливість створення кількох варіантів одного і того ж сегмента, але з різним ступенем деталізації. Залежно від швидкості або завантаженості комп'ютера можна вибирати більш менш деталізовані варіанти (так звані LOD ландшафти – LOD – Level Of Detail).

Виходячи із зазначеного, можна зробити висновки про доцільність використання методів карти висот. При цьому можливі різні варіанти їх використання (або в регулярній формі або у формі зберігання індексів ландшафтних сегментів).

Дуже важливим питанням при моделюванні довкілля є вибір методу генерації ландшафту.

Проведені дослідження показали, що в даний час напрацьовано значні теоретичні матеріали [11-13] і розробники пропонують безліч різних методів генерації ландшафтів (пагорбовий метод [12], метод висотного шуму [11], фрактальні методи [13] та ін.). Однак, ряд переваг фрактальних методів (генерація ландшафтів підвищеної складності, продовження ландшафтів у довільному напрямку, можливість урахування особливостей поверхонь за допомогою процедур фільтрації та ін.) дозволили зробити висновок про доцільність використання цих методів генерації.

Розроблена модель довкілля складається із трьох етапів: генерація карти низької частоти, адаптація карти до реальних умов ландшафту за допомогою фрактального шуму, накладення сітки моделі.

На першому етапі карта рельєфу представляється у вигляді множини

$$\mathcal{S} = H(i, j), i = 1, 2, \dots, h, j = 1, 2, \dots, w,$$

де  $w$  і  $h$  – розміри карти. Ця множина визначає висоти рельєфу  $H(i, j)$  в точці з координатами  $(j, i)$ . Карта рельєфу містить базові елементи, які визначаються деяким набором параметрів: степовий ландшафт, лісовий ландшафт, гірський ландшафт, водний ландшафт, засніжений ландшафт. Конттури цих елементів визначаються за допомогою фрактальних ліній, а висоти в точках отримуються в результаті обчислення різних функцій, що залежать від віддаленості точок від контурних ліній.

На другому етапі виконується генерація і накладення фрактального шуму для перекриття відсутніх частот представлення ландшафту. Ця генерація частот, що залишилися, від  $1/20 \text{ м}^{-1}$  здійснюється за допомогою шумової функції. При цьому два набори частот шуму визначається за допомогою виразів:

$$f_{\ell} = f_{\ell, i} = \frac{2^{i-1}}{\text{resol}}; \quad (1)$$

$$f_h = (f_{h, j}) = \frac{2^{j+n_i}}{\text{resol}}, \quad (2)$$

де  $n_{\ell} = \lfloor \log_2 2 \cdot \text{resol} \rfloor$ ,  $n_h = \lfloor \log_2 (p_w^{-1} 2^{-n_i} \cdot \text{resol}) \rfloor$ ,

$p_w$  – розмір фрагменту, що виводиться, в метрах;

$i = 0, 1, \dots, n_{\ell}$ ,  $j = 0, 1, \dots, n_h$ .

Використовуючи низку розробок авторів [14] можна визначити шумову функцію:

$$N(X, t) = \sum_{i=0}^{n_i} \frac{2}{f_i} P(f_i X) (I_S(f, x_1, x_2)) + (I_R(f, x_1, x_2)), \quad (3)$$

$$I_S(f, x_1, x_2) = \left( 1 - \sqrt{\frac{\min(f, f_{\max}) - f_{\ell_0}}{f_{\max} - f_{\ell_0}}} \right) \left( 1 - \cos(\pi S'_{x_1, x_2}) \right)^2$$

– функція впливу ухилу;

$$I_R(f, x_1, x_2) = \sqrt{\frac{\min(f, f_{\max}) - f_{\ell_0}}{f_{\max} - f_{\ell_0}}} (0,9R'_{x_1, x_2} + 0,1)$$

– функція впливу нерівностей;

$S'_{x_1, x_2}$  і  $R'_{x_1, x_2}$  – значення, що отримуються з карти

ухилу  $\mathfrak{S}=(S_{i,j})$  і карти нерівностей  $\mathfrak{R}=(R_{i,j})$  за допомогою білінійної інтерполяції;  $R_{i,j}$  – середньоквадратичне відхилення значень високочастотної складової висот на околиці точки  $H_{i,j}$  розміром  $9 \times 9$ ;

$$S_{i,j} = \frac{2 \arccos(n_{ij,z})}{\pi}; \quad n_{ij} = (n_{ij,x}, n_{ij,y}, n_{ij,z}) - \text{нормаль до}$$

низькочастотної складової  $\mathfrak{S}$  в точці  $(i, j)$ ;  $P(X)$  – тривимірний шум Перлина,  $X = (x_1, x_2, x_3)$ ;

$$f_{\max} = 20M^{-1}. \text{ На третьому етапі при накладенні сітки}$$

моделі використовуємо карту рельєфу  $\mathfrak{S} = H(i, j)$ ,

шумову функцію  $N(X, t)$  та набір низьких частот  $f_\ell$ .

При цьому визначимо функцію щільності поверхні

$$v(X) = x_3 - H_{x_1, x_2} + N(X, \ell), \text{ де значення}$$

$H_{x_1, x_2}$  отримане з  $\mathfrak{S}$  в результаті білінійної інтерполяції.

Якщо  $v(X) = 0$  поверхня рельєфу, що генерується, то у випадку коли  $v(X) > 0$  точка  $X$  знаходиться над поверхнею ландшафту.

Якщо апроксимувати поверхню  $v(X) = 0$  трикутними гранями, а як алгоритм триангуляції обрати алгоритм маршрутуючих кубів, результатом роботи цього алгоритму стане набір вершин, що утворюють трикутні грані, які апроксимують поверхню, що шукається.

В результаті роботи алгоритму утворюються кілька ізольованих поверхонь. Усі поверхні, крім тієї, що містить найбільше трикутників, видаляються.

Також для кожної вершини обчислюється нормаль до поверхні. Дуже важливими елементами моделі навколишнього середовища є активні перешкоди. Ці перешкоди повинні імітувати засоби ППО (активні чи пасивні).

У моделі, що розробляється, елементи активних перешкод візуалізуються за допомогою пірамід червоного кольору. Розмір пірамід зменшується з віддаленням об'єктів на тривимірній карті.

Приклад моделі навколишнього середовища з пасивними та активними елементами представлений на рис. 1.

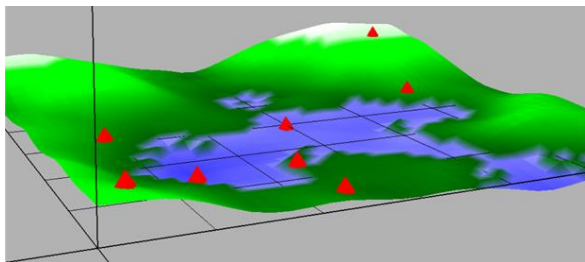


Рис. 1. Ілюстрація моделі навколишнього середовища

## 1.2. Побудова розширеного графа маршрутів пересування БПЛА у просторі

Для побудови розширеного графа маршрутів пересування БПЛА у просторі (дорожньої карти маршрутів) візьмемо за основу модифікацію методу дорожньої карти ймовірності, описану в роботі [15]. Ця модифікація адаптована до умов присутності активних перешкод на карті місцевості.

У класичному методі ймовірнісної дорожньої карти [16] процес генерації шляхових точок відбува-

ється в такий спосіб. У просторі побудови моделі навколишнього середовища точка вибирається з використанням рівномірного закону розподілу. Якщо ця точка потрапляє в активну перешкоду, вона виключається з дорожньої карти. В іншому випадку вона залишається в пулі можливих точок маршруту. В результаті такої процедури відбору ми отримуємо вибірку для рівномірного розподілу у вільній області навколишнього середовища.

Недоліком такого підходу є відсутність адаптивного обліку просторового розташування активних перешкод і, таким чином, можливі втрати потенційно раціонального простору установки шляхових точок у просторі. Це значною мірою знижує можливість алгоритмів знаходження оптимального маршруту надалі.

Для усунення цього недоліку авторами [15] пропонується модифікація методу встановлення та вибору шляхових точок, звана методом хвильового поширення. Можна виділити його основні етапи.

Суть установки та вибору шляхових точок полягає в наступному. В області дорожньої карти на підставі горизонтальної площини  $XOY$ , на якій розташовані перешкоди, використовується полярна система координат. Її початкова точка – це проекція стартової точки на основу  $XOY$ , а полярна вісь спрямована від стартової точки до проекції на основу  $XOY$  кінцевої точки. Як шляхові точки пропонується вибрати точки в просторі, проекції яких на основу  $XOY$  знаходяться на концентричних колах з центром у стартовій точці. Радіуси концентричних кіл вибираємо з фіксованим кроком  $dr = D/N$ , де  $D$  – відстань між проекціями початкової і кінцевої точок;  $N$  – кількість кіл. Таким чином, коло з номером  $n$  має радіус  $r_n = dr \cdot n$ . Таким же регулярним чином вибираємо точки на колах, причому довжини дуг між сусідніми точками на різних колах повинні бути близькими. Координати проекції шляхової точки описуються як:

$$\begin{aligned} x_{nm} &= x_0 + dr \cdot n \cdot \cos \frac{2\pi m}{k_n}, \\ y_{nm} &= y_0 + dr \cdot n \cdot \sin \frac{2\pi m}{k_n}, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $n \leq N$  – номер концентричного кола;  $m \leq k_n$  – номер точки на колі;  $k$  – параметр, що регулює кількість точок на колі (на колі з номером  $n$  обираються  $k_n$  точок).

Параметри і визначають щільність точок на горизонтальній площині, які розташовані регулярно і рівномірно. Характерними відстанями у цьому наборі є  $dr$  і  $2\pi/k$ . Приклад вибору точок хвильовим методом представлений на рис. 2, а.

Висоти шляхових точок визначаються з урахуванням карти висот. Якщо  $h_{\max}$  – максимальна висота області дорожньої карти, а  $h_{nm} = h(x_{nm}, y_{nm})$  – значення карти висот точки  $(x_{nm}, y_{nm})$ , то третя координата шляхової точки – випадкова величина, рівномірно розподілена на відрізку  $[h_{nm}, h_{\max}]$ . Використовуючи датчик псевдовипадкових чисел  $rand$ ,

що дає значення на відрізку  $[0,1]$ , отримаємо вираз для розрахунку висоти.

$$H_{nm} = h_{nm} + rand(h_{max} - h_{nm}). \quad (5)$$

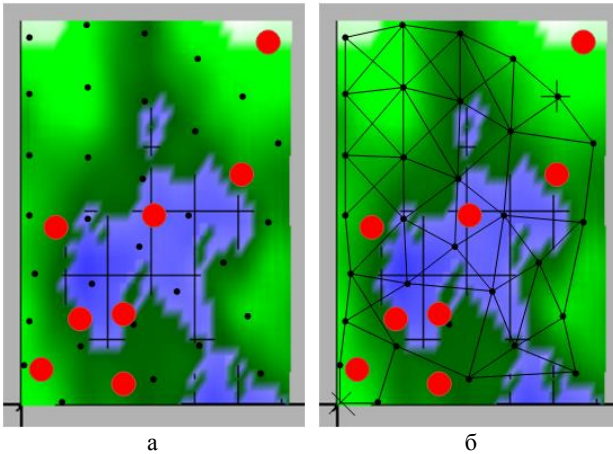


Рис. 2. Ілюстрації:

- а – прикладу вибору точок хвильовим методом  
б – розширений граф маршрутів пересування БПЛА

У деяких випадках, коли  $h_{max} \leq \max(H_{nm})$ , встановлення точки стає неможливим. Такі точки виключаються з множини шляхових.

Більшість алгоритмів пошуку з'єднань точок та побудови графа передбачають перегляд усіх пар шляхових точок. Це може аргументовано вибрати оптимальний маршрут руху. Однак, на практиці, при пересуванні БПЛА таке трудомістке завдання може значно збільшити час композиції маршруту. Тому в роботі пропонується для кожної точки в якості пари переглядати тільки точки розташовані на відстані  $l \leq l_{доп}$  менше від допустимого. Вибір значення  $l_{доп}$  можна виконати за допомогою алгоритму пошуку з'єднання точок, представленого у роботі [17].

При побудові дорожньої карти частина витрат часу йде на перевірку можливих зіткнень із перешкодами. При цьому універсальним способом виявлення колізій відрізка прямої є перевірка деякого набору точок відрізка на приналежність до перешкод. Можна виділити два підходи до виділення набору точок, що перевіряються [17]: зростаючий і бінарний. У зростаючому підході точки на відрізку розташовуються регулярно від одного кінця до іншого. У бінарному підході використовують метод поділу навпіл – перевіряється можливе зіткнення з перешкодами у середині відрізка і далі процес повторюється для окремих частин відрізка. За відсутності колізій процес поділу навпіл зупиняється, якщо відстань між сусідніми точками стає меншою за задане значення. Ілюстрація розширеного графа маршрутів пересування БПЛА представлена рис. 2, б.

### 1.3. Пошук найкоротшого шляху у розширеному графі маршрутів пересування БПЛА

Ще одним завданням у загальній структурі завдань розробки комплексу моделей композиції маршруту БПЛА у просторі є пошук найкоротшого шляху у розширеному графі маршрутів пересування БПЛА. Це завдання вирішувалося з використанням алгоритму

$A^*$ , який є розвитком алгоритму Дейкстри [18]. З багатьох джерел відомо, що алгоритм Дейкстри доцільно використовувати при пошуку найкоротшого шляху від одного виток до множини стоків. Проте час, що витрачається на дослідження всіх напрямів, зокрема і безперспективних, досить великий. У свою чергу алгоритм  $A^*$  – модифікація алгоритму Дейкстри, оптимізована для пошуку шляху в задану кінцеву точку. Даний алгоритм пріоритетизує маршрути, що є найбільш раціональними рішеннями, за допомогою процедури модифікації функції вартості графа. Це дозволяє зменшити час на пошук оптимального маршруту.

Функцію модифікації функції вартості графа можна представити наступним чином:

$$F(v) = S(v) + e(v), \quad (6)$$

де  $S(v)$  – функція вартості досягнення даної вершини з початкової (як в алгоритмі Дейкстри);  $e(v)$  – евристична функція оцінки відстані від даної точки до кінцевої точки, зазвичай дорівнює відстані між двома точками в якій-небудь нормі.

Алгоритм  $A^*$  працює аналогічно алгоритму Дейкстри. Проте вибір чергової вершини проводиться за значенням функції  $F(v)$ , причому проглядаються не всі вершини, лише частина, значення функції вартості яких потрапляють у допустимі межі. Таким чином, в результаті виконання трьох етапів отримуємо ламану, що з'єднує початкову та кінцеву точки по послідовності шляхових точок. Це допустимий шлях, який має властивість відносної оптимальності як найкращий шлях у побудованому графі.

### 1.4. Модель згладжування ламаної лінії в середовищі з активними та пасивними перешкодами

Після того, як побудована ламана лінія (найкоротший шлях), що з'єднує стартову та кінцеву точки, необхідно провести процедуру згладжування, яка в результаті і дасть гладку криву, вздовж якої доцільно виконувати поставлене БПЛА завдання. Однією з наукових задач при цьому є задача виконання згладжування траєкторії таким чином, щоб для гладкого шляху збереглася умова відсутності перетину з активними та пасивними перешкодами. При цьому необхідно врахувати фактор радіусу дій активних перешкод (що може змінити криву згладжування).

Проведені дослідження показали, що в даний час використовується ряд підходів розрахунку траєкторії, що згладжує. Відносно простим підходом є локальний, при якому процедура згладжування виконується лише в околицях вузлів ламаної лінії. В даному підході можна контролювати можливі перетини з перешкодами. При цьому точність розрахунків залишається у допустимих нормах. Наприклад, достатньо знати відстань від вузла ламаної до найближчої перешкоди, вона визначає ту околицю, в якій можна виконати згладжування з гарантованою відсутністю перетинів з перешкодами.

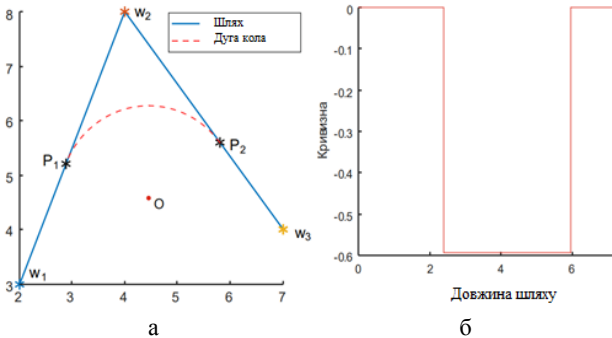
Аналіз літератури дозволив виділити низку методів, що реалізуються в рамках концепції локального згладжування (метод Dubins, метод полярних багаточленів, кубічні криві Безьє, нерівномірні кубі-

чні B-сплайн і ін.). Метод Dubins полягає у заміні прилеглих до кута ламаної частин відрізків дугою кола (рис. 3), і забезпечує лише перший порядок гладкості, кривизна кривої виявляється розривною, розриви виникають у точці з'єднання.

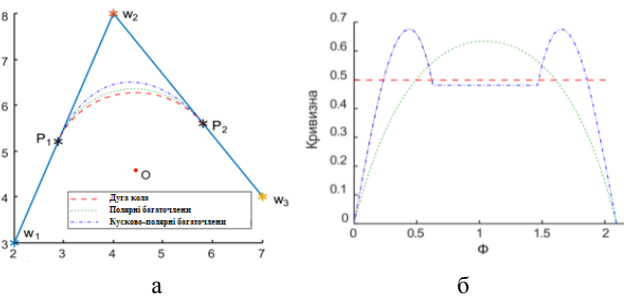
Для вирішення проблеми з розривом кривизни шляху можна використовувати інші криві, наприклад, полярні багаточлени [17] – багаточлени, записані в полярних координатах:

$$r(\varphi) = a_0 + a_1\varphi + a_2\varphi^2 + a_3\varphi^3 + a_4\varphi^4.$$

Порівняння результатів згладжування за допомогою дуги кола, полярного багаточлена та кусково-полярного багаточлена представлено на рис. 4.



**Рис. 3.** Згладжування ламаної за методом Dubins: а – ламана та згладжена крива; б – зміни кривизни вздовж згладженої кривої

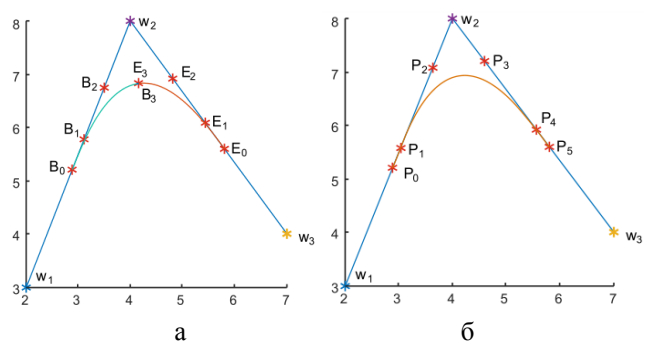


**Рис. 4.** Згладжування шляху методом полярних багаточленів: а – згладжені криві, отримані трьома методами; б – порівняння кривизни трьох видів згладженої кривої

Полярна система координат в даному випадку задається наступним чином: початок системи координат міститься в точку  $P_1$  – центр згладжуючого кола (рис. 4. а), а початкова вісь поєднується з радіусом згладжуючого кола, що йде в точку. Полярний багаточлен повинен відповідати положенням початкової і кінцевої точок (точок торкання ліній і кола, що згладжує). Умови для гладкого з'єднання такі:

$$r(0) = d_r, r'(0) = d_r, k(0) = 0, \\ r(\Phi) = d_r, r'(\Phi) = d_r, k(\Phi) = 0,$$

де  $k(\varphi)$  – функція кривизни,  $\Phi$  – кут між векторами  $\overline{OP_1}$  і  $\overline{OP_2}$ . Одними з найбільш популярних серед розробників методів згладжування траєкторій в даний час є кубічні криві Безьє (прості або класу  $C^2$ ), а також нерівномірні кубічні B-сплайни. Приклади ілюстрації графіків згладжування траєкторій з використанням цих методів представлені на рис. 5.



**Рис. 5.** Приклади ілюстрації методів згладжування: а – крива Безьє класу  $C^2$ , б – нерівномірний кубічний B-сплайн

Зауважимо, що у разі кривої Безьє класу  $C^2$ , перша крива задається 4 контрольними точками:

$$B_0 = W_2 - d_{t1} q_1, B_1 = B_0 + g_b q_1, \\ B_2 = B_1 + h_b q_1, B_3 = B_2 + k_b u_d,$$

Друга крива задається чотирма контрольними точками, що залишилися:

$$E_0 = W_2 + d_{t2} q_2, E_1 = B_0 - g_e q_2, \\ E_2 = B_1 - h_e q_1, E_3 = B_0 - k_e u_d,$$

де  $d_{t1}$  – довжина від  $W_2$  до  $B_0$ ;  $d_{t2}$  – довжина від  $W_2$  до  $E_0$ ;  $q_1$  – одиничний вектор від  $W_1$  до  $W_2$ ;  $q_2$  – одиничний вектор від  $W_2$  до  $W_3$ ;  $u_d$  – одиничний вектор  $\overline{B_2 E_2}$ .

Прийняті величини параметрів:

$$d_{t1} = d_{t2} = d_t, h_b = h_e = 0,346d_t, g_b = g_e = 0,58h_b, \\ k_b = k_e = 1,31h_b \cos \beta \quad [17], \beta = \gamma/2, \gamma = \pi - \Theta.$$

Щодо B-сплайнової кривої, щоб вона мала безперервну кривизну, її гладкість повинна бути не нижче  $C^2$ , тобто. порядок сплайну має бути не нижче 4. Порядок 4 відповідає кубічному сплайну. При  $k = 4$  загальна кількість вузлів має бути не менше 8. Це мінімальна кількість, але потрібні додаткові вузли.

При 9 контрольних точках маємо вектор  $T = \{0,0,0,0,t_4,1,1,1,1\}$ , у якому лише один вільний вузол  $t_4$ . Однак у разі природної вимоги симетричності  $t_4 = 0,5$  та вектор вузлів виявляється фіксованим [17]. Дев'ятивимірному вектору вузлів відповідає п'ять контрольних точок, яких, з урахуванням симетрії кривої, недостатньо для регулювання в кінцях кривої. Пропонується використовувати симетричний 10-мірний вектор вузлів  $T = \{0,0,0,0,t_4,t_5,1,1,1,1\}$ , де  $t_4 < t_5, t_4 + t_5 = 1$ . Йому відповідає 6 контрольних точок  $P_i$ , рис. 6. б. Розташування контрольних точок:

$$P_0 = P_1 - k_2 d_s q_1, P_1 = P_2 - k_1 d_s q_1, P_2 = W_2 - d_s q_1, \\ P_3 = W_2 - d_s q_2, P_4 = P_2 + k_1 d_s q_2, P_5 = P_1 + k_2 d_s q_2,$$

де  $P_0 = q_1 = W_2 - W_1, q_2 = W_3 - W_2$ .

Параметри  $k_1, k_2, q_1$  регулюють відстані від вершини ламаної  $W_2$  до контрольних точок. Проведемо порівняльні дослідження. На рис. 6 представлено порівняння результатів згладжування шляху та кривизни шляху за умови, що мінімальний радіус повороту однаковий (тобто максимальна кривизна однакова).

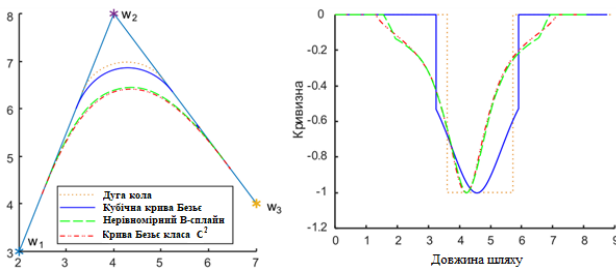


Рис. 6. Графіки порівняння методів згладжування за умови, що мінімальний радіус повороту однаковий

Проведений аналіз показує, що метод нерівномірного кубічного B-сплайну практично можна порівняти з методом кривих Безьє класу  $C^2$ , проте він є більш простим у реалізації. Крім того, оптимізація параметра  $d_i$  дозволить покращити показники згладжування.

Таким чином, можна дійти висновку про доцільність методу нерівномірного кубічного B-сплайну для вирішення задачі згладжування траєкторії руху БПЛА в просторі на обраному маршруті.

Для вирішення задачі вибору та оптимізації параметра згладжування  $d_i$ , який бере участь у згладжуванні в околиці вузла, розглянемо дві умови. Перша умова полягає в тому, що параметр  $d_i$  не повинен перевищувати половини мінімальної з довжин сегментів, що прилягають до вузла. Це дозволяє проводити процедуру згладжування у різних вузлах незалежно один від одного. Друга умова – параметр  $d_i$  має бути обмежений умовою відсутності перетину кривих згладжування з перешкодами.

Обидві умови вимагають зниження значення параметра  $d_i$ . Однак це зниження призводить до підвищення значення кривизни, що ускладнює реалізацію місії. Тому виникає завдання оптимального вибору параметра  $d_i$ .

Розглянемо спочатку завдання вибору максимально можливого параметра  $d_i$ , що забезпечує виконання першої умови: частини сегментів лананої, у яких відбувається згладжування, не перетинаються. Позначимо через  $\ell_i$ ,  $i = \overline{1, N}$ , довжини сегментів лананої і нехай  $d_i$ ,  $i = \overline{2, N-1}$ , параметри згладжування для внутрішніх вузлів лананої. Тоді мають виконуватися нерівності:

$$d_{i_2} < \ell_1; d_i + d_{i+1} < \ell_i, i = \overline{2, N-2}; d_{i_{N-1}} < \ell_N. \quad (7)$$

Якщо всі  $d_i$  однакові, рішення виглядає так:

$$d_i = \min \left\{ \ell_1, \frac{\ell_2}{2}, \frac{\ell_3}{2}, \dots, \frac{\ell_{N-1}}{2}, \ell_N \right\}. \quad (8)$$

При різних параметрах  $d_i$

$$d_{i_1} = \min \left\{ \ell_1, \frac{\ell_2}{2} \right\}; d_{i_2} = \min \left\{ \frac{\ell_i}{2}, \frac{\ell_{i+1}}{2} \right\}; \dots \quad (9)$$

З урахуванням обмежень (7) сформулюємо завдання оптимізації в такий спосіб.

$$L(d_{i_2}, d_{i_3}, \dots, d_{i_{N-1}}) \rightarrow \max; \quad (10)$$

$$d_{i_2} < \ell_1; d_i + d_{i+1} < \ell_i, i = \overline{2, N-2}; d_{i_{N-1}} < \ell_N.$$

де  $L$  – цільова функція, функціонал якості рішення.

У момент холодного старту для вирішення оптимізаційної задачі можна використати ситуацію, описану умовою (8). У розглянутій оптимізаційній задачі можна врахувати відстань  $r_i$  від  $i$ -го вузла до найближчої перешкоди. Якщо  $d_i < r_i$ , то перетинів із перешкодами після згладжування не буде.

Наведений підхід дозволяє вирішити задачу згладжування траєкторії. Однак, умови моделі (7)-(10) мають загальний характер і можуть призвести до зниження параметрів згладжування. Більш раціональною є наступна стратегія. Як вихідні вибираємо значення  $d_i$ , отримані з рішення оптимізаційної задачі. Побудувавши криву згладжування у вузлі, перевіряємо, чи перетинається ця крива з перешкодами. Якщо так, зменшуємо відповідне значення у півтора рази і знову перевіряємо на перетин з перешкодами. Процедуру для кожного вузла повторюємо, доки перетини з перешкодами не зникнуть.

Слід зауважити, що у тривимірному випадку процес згладжування такий самий, як і у двовимірному: згладжування в даному вузлі стосується двох ланок лананої, які лежать в одній площині. Особливостей у зв'язку із тривимірним простором немає.

Таким чином, для заданого набору перешкод (довкілля) та заданих стартової та кінцевої точок синтезовано маршрут руху з обходом перешкод.

## 2. Дослідження методу композиції маршруту БПЛА у просторі

Використовуючи результати імітаційного моделювання з допомогою програмного комплексу [19], проведемо певний аналіз властивостей запропонованих методів та способів. Проаналізуємо вплив конфігурації перешкод на успішність планування траєкторії польоту БПЛА, як характеристики конфігурації перешкод розглянемо площу основи, зайняту перешкодами, і величину мінімального зазору між перешкодами. У табл. 1 представлені вихідні дані про перешкоди двох прикладів порівнянь. Результати моделювання представлені в табл. 2. Ці результати показують, що зменшення зазору між перешкодами у разі методу дорожньої карти ймовірності призводить до зменшення ймовірності успішного побудови шляху прямування. Що стосується методу хвильового поширення вплив цього чинника незначно. Проаналізуємо вплив на успішність планування площі, що займається на підставі перешкод. Обчислювальний експеримент сплановано так, що за зміни площі перешкод величина мінімального зазору між перешкодами майже не змінюється. Знову використовуємо конфігурацію із двома перешкодами. Площа перешкод поступово збільшується спочатку за рахунок площі першої перешкоди, потім другої.

Результати описаного експерименту представлені табл. 3. Крім того, проведений експеримент дозволив отримати данні для розрахунку показника ймовірності перехвату БПЛА в режимі автономного польоту. З'ясовано, що використання запропонованого методу композиції маршруту БПЛА у просторі знижує цей показник до 1,5 разів.



Таблиця 1 – Вихідні дані про перешкоди двох прикладів порівнянь

Номер прикладу	Номер варіанту	Координати центру	Розміри (шир., дов., вис.)	Кут орієнтації
1	1	100,200	130,140,140	60
		230,80	120,100,190	-20
	2	100,200	130,140,140	60
		230,110	120,100,190	-20
	3	100,200	130,140,140	60
		230,120	120,100,190	-20
2	1	115,174	60,140,140	60
		203,128	60,60,190	-20
	2	100,200	130,140,140	60
		203,128	60,60,190	-20
	3	100,200	130,140,140	60
		230,90	120,100,190	-20

Таблиця 2 – Кількість успішних спроб планування колії в залежності від зазору між перешкодами

Номер варіанту	Метод ймовірнісної дорожньої карти	Метод хвильового розповсюдження
1	19	20
2	16	20
3	17	20

Таблиця 3 – Кількість успішних спроб планування шляху в залежності від площі основи, що займають перешкоди

Номер варіанту	Метод ймовірнісної дорожньої карти	Метод хвильового розповсюдження
1	20	20
2	20	20
3	18	20

## Висновки

Розроблено метод композиції маршруту БПЛА у просторі. Основною відмінністю представленого методу є комплексне врахування особливостей навколишнього середовища, що відображає можливі перешкоди (активні або пасивні) та інші обмеження задачі при композиції маршруту безпілотного літального апарату в тривимірному просторі. Це дозволило підвищити показник ймовірності перехвату БПЛА в режимі автономного польоту до 1,5 разів.

При дослідженні методу проведено аналіз основних підходів композиції маршрутів БПЛА у просторі та запропоновано чотири етапи виконання завдання. Це етапи моделювання навколишнього середовища, побудови розширеного графу маршрутів пересування безпілотного літального апарату у просторі, пошуку маршруту, що з'єднує стартову точку з кінцевою, а також етап отримання кінцевого результату.

Основними відмінностями результатів досліджень на цих етапах є врахування тривимірних активних та пасивних перешкод при моделюванні навколишнього середовища, адаптивне врахування просторового розташування активних перешкод у просторі при побудові розширеного графу маршрутів пересування БПЛА, а також вибір та оптимізація параметра згладжування за допомогою методу нерівномірного кубічного B-сплайну, при отриманні кінцевого результату композиції маршруту БПЛА у просторі. Це підвищило безпеку виконання завдання у автономних умовах польоту.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ (REFERENCES)

1. S. Huang and R. S. H. Teo, "Computationally Efficient Visibility Graph-Based Generation Of 3D Shortest Collision-Free Path Among Polyhedral Obstacles For Unmanned Aerial Vehicles," *ICUAS*, 2019, pp. 1218-1223, doi: 10.1109/ICUAS.2019.8798322.
2. Puente-Castro, A., Rivero, D., Pazos, A. et al. A review of artificial intelligence applied to path planning in UAV swarms. *Neural Comput & Applic* (2021). <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06569-4>
3. Semenov, S., Voloshyn, D., Ahmed, A.N. Mathematical model of the implementation process of flight task of unmanned aerial vehicle in the conditions of external impact. *Int. J. of Adv. Trends in Com. Sc. and Engineering*, 2019, 8(1), pp. 7–13.
4. Semenov, S., Sira, O., Kuchuk, N. Development of graphanalytical models for the software security testing algorithm // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, 2(4-92), pp. 39–46
5. Park S., Deyst J., How P.J. A new nonlinear guidance logic for trajectory tracking // *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Providence, Rhode Island, 16–19 August 2004. Art. No. AIAA 2004-4900
6. Sujit B.P., Saripalli S., Borges Sousa J. Unmanned Aerial Vehicle Path Following: A Survey and Analysis of Algorithms for Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle // *Control Systems*. 2014. Vol. 34. No. 1. P. 42–59.
7. Jung L.F. Three-dimensional path planning of unmanned aerial vehicles using particle swarm optimization // *11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*. Reston, VA, USA. 992-1001. P. 2006.
8. Fan X., Li S., Chen Tefang T. Dynamic obstacle avoiding path plan for robots based on a new artificial potential field function // *Control Theory & Applications*. 2005. Vol. 22. No. 5. P. 703–707
9. Ramírez-Torres, José & Larranaga-Cepeda, Ander. (2015). Real-Time Reconstruction of Heightmaps from Images Taken with an UAV. *Mechanisms and Machine Science*. 37. 221-231. 10.1007/978-3-319-22368-1\_22.
10. Li, Y. & Kobayashi, Y. & Wonka, P. & Zhang, E.. (2010). Editing Operations for Irregular Vertices in Triangle Meshes. *ACM Transactions on Graphics*. 29. 1-12. 10.1145/1882261.1866179.
11. Кожухов Д. Генерация трехмерных ландшафтов. URL: <https://www.ixbt.com/video/3dterrains-generation.shtml>
12. Curtis, Christopher & Deconinck, Bernard. (2010). On the convergence of Hill's method. *Math. Comput.*. 79. 169-187.
13. Y. Fu, Z. Zheng, D. Fu and Y. Tong, "Comparison of two fractal surface modeling methods," 2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), 2016, pp. 417-421, doi: 10.1109/WCICA.2016.7578280.
14. Hyttinen, Tuomo & Mäkinen, Erkki & Poranen, Timo. (2017). Terrain synthesis using noise by examples. 17-25.
15. Ladd A.M., Kavraki L.E. Measure theoretic analysis of probabilistic path planning. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 2004, vol. 20, no. 2, pp. 229–242.
16. Titas Bera, M. Seetharama Bhat, Debasish Ghose, Analysis of Obstacle based Probabilistic RoadMap Method using Geometric Probability, *IFAC Proc.*, Vol/ 47, Issue 1, 2014, Pages 462-469, <https://doi.org/10.3182/20140313-3-IN-3024.00245>.
17. Wei L., Zheng Zheng, Kaiyuan Cai, Adaptive path planning for unmanned aerial vehicles based on bi-level programming and variable planning time interval, *Chinese J. of Aeronautics*, Vol. 26, Is. 3, 2013, pp 646-660, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2013.04.041>.

18. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs // Numer. Math / F. Brezzi – Springer-Verlag, 1959. – Vol. 1, Iss. 1. – P. 269–271. – ISSN 0029-599X; 0945-3245 – doi:10.1007/BF01386390
19. Золотухіна О. А., Волошин Д. Г., Давидов В. В., Бречко В. О. Розробка імітаційної моделі процесу розрахунку і коригування безпечної польотної траєкторії безпілотного літального апарату // Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2020. № 4 (69). С. 87–94.

Received (Надійшла) 25.08.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.10.2021

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Волошин Денис Геннадійович** – аспірант кафедри "Обчислювальна техніка та програмування", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

**Denys Voloshyn** – graduate student of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [ultrageron@gmail.com](mailto:ultrageron@gmail.com); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1077-9658>.

**Бречко Вероніка Олександрівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Обчислювальна техніка та програмування", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

**Veronika Brechko** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [nikabrechko@gmail.com](mailto:nikabrechko@gmail.com); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9578-2102>.

**Семенов Сергій Геннадійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Обчислювальна техніка та програмування", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

**Serhii Semenov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [s\\_semenov@ukr.net](mailto:s_semenov@ukr.net); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4472-9234>.

#### Метод композиції маршрута безпілотного летального апарата в просторі

Д. Г. Волошин, В. О. Бречко, С. Г. Семенов

**Анотація.** Стаття посвячена розробці методу композиції маршрута безпілотного летального апарата в тривимірному просторі. Основним відмінням представленої методу є комплексний урахування особливостей середовища, що відображає можливі перешкоди (активні або пасивні) та інші обмеження задачі при композиції маршрута безпілотного летального апарата в тривимірному просторі. Це дозволило підвищити безпеку виконання задачі в автономних умовах польоту. В статті проведено аналіз основних підходів до композиції маршрутів безпілотного летального апарата в просторі. Сделано висновок про недоліки двовимірної представлення. В методі представлено чотири етапи виконання задачі. Це етап моделювання середовища, що відображає можливі перешкоди (активні або пасивні) та інші обмеження задачі. Етап побудови розширеної графа маршрутів передвигнення безпілотного летального апарата в просторі. Відмінням цього етапу є адаптивний урахування просторового розташування активних перешкод в просторі. Наступний етап – пошук маршруту, що з'єднує стартову точку з кінцевою і обходить всі перешкоди та дає можливість побудови початкового маршруту в вигляді ламаної лінії, формуючої послідовність пунктів, і з'єднуючої стартову точку з кінцевою, минувши перешкоди. Останнім є етап отримання кінцевого результату, який забезпечується згладжуванням отриманої ламаної лінії. В цій частині методу композиції для рішення задачі згладжування траєкторії руху безпілотного летального апарата в просторі на вибраному маршруті доведено доцільність використання нерівномірного методу кубічного B-сплайна. С допомогою цього методу поставлена і вирішена задача вибору та оптимізації параметра згладжування.

**Ключевые слова:** безпілотний летальний апарат; імітаційна модель; безпека; траєкторія польоту.

#### Method of an unmanned aerial vehicle composition route in space

Denys Voloshyn, Veronika Brechko, Serhii Semenov

**Abstract.** The article is devoted to the development of a method of composition of the route of an unmanned aerial vehicle in three-dimensional space. The main difference of the presented method is the complex consideration of the features of the environment, which reflects the possible obstacles (active or passive) and other limitations of the problem when composing the route of the unmanned aerial vehicle in three-dimensional space. This allowed to increase the safety of the task in autonomous flight conditions. The article analyzes the main approaches to the composition of unmanned aerial vehicle routes in space. The conclusion about the shortcomings of the two-dimensional representation is made. The method presents four stages of the task. This is the stage of modeling the environment that reflects possible obstacles (active or passive) and other limitations of the task. Stage of construction of an extended graph of unmanned aerial vehicle routes in space. The difference of this stage is the adaptive consideration of the spatial location of active obstacles in space. The next stage is the route search stage, which connects the starting point with the end and bypasses all obstacles and allows you to build a starting route in the form of a broken line, which is formed by a sequence of waypoints, and connects the starting point with the end, bypassing obstacles. The last is the stage of obtaining the final result, which is provided by smoothing the obtained broken line. In this part of the composition method, to solve the problem of smoothing the trajectory of the unmanned aerial vehicle in space on the selected route, the expediency of using the method of non-uniform cubic B-spline is proved. With the help of this method the task of selection and optimization of the smoothing parameter is set and solved.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; simulation model; safety; flight trajectory.

С. М. Порошин, В. В. Усик, І. С. Беліков

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

## МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ АКУСТИЧНИХ УМОВ ПЕРЕДАЧІ МОВНОГО КОНТЕНТУ В ПРИМІЩЕННЯХ МАЛИХ ОБСЯГІВ

**Анотація.** Предметом дослідження у статті є методологія проведення експертизи приміщень малих обсягів з використанням переважно мовного контенту. **Метою роботи** є аналіз усіх етапів проведення акустичної експертизи для приміщень переговорних, конференц-залів, прес-центрів, визначення обсягів та послідовності проведення етапів з урахуванням специфічних обмежень та умов, що виникають у приміщеннях малих обсягів. У роботі розглянуто всі етапи акустичної експертизи на прикладах реальних приміщень переговорних, конференц-залів, прес-центрів. Послідовність етапів експертизи при її проведенні для приміщень малих обсягів не зазнала значних змін порівняно з послідовністю, яка використовується для глядацьких залів. Основною відмінністю, при проведенні першого етапу акустичної експертизи в приміщеннях малих обсягів з використанням мовного контенту, є аналіз структур ревербераційного процесу в місцях прослуховування з метою виявлення недоліків формування дифузного поля, замість робіт з перевірки геометрії огорожувальних поверхонь стінових і стельових панелей, що проводиться з використанням геометричної теорії. Особливістю другого етапу є розробка рекомендацій для підвищення звукопоглинаючих властивостей огорожувальних поверхонь та усунення ефекту багаторазового перевідбиття звукової енергії між паралельними поверхнями, за рахунок використання часткової заміни геометрії поверхонь, роботи з підвісними стельовими конструкціями та використання звукопоглинальних штор (для корекції властивостей скляних поверхонь). Третій та четверті етапи експертизи залишилися незмінними.

**Ключові слова:** акустична експертиза; етапи акустичної експертизи; структура ревербераційного процесу; оптимальні акустичні умови.

### Вступ

З усього різноманіття приміщень, які потребують створення оптимальних акустичних умов, слід виділити групу приміщень спеціального призначення, а саме: переговорні, конференц-зали, зали засідань, прес-центри. Подібні приміщення відрізняються низкою специфічних особливостей, наявність яких визначає етапи проведення акустичної експертизи, обсяг робіт під час її проведення, використання спеціальних заходів щодо оптимізації звукового поля. До таких особливостей можна віднести:

- малий обсяг приміщення, що призводить до істотного впливу спектра власних частот на звуковий контент, а також зменшується кількість можливих варіантів корекції геометрії профілів огорожувальних конструкцій з метою підвищення дифузності звукового поля;

- будівельні та оздоблювальні матеріали, що застосовуються – використання у великій кількості скляних поверхонь (стіл, дверей), легких перегородок, що призводить до обмежень щодо розробки рекомендацій для оптимізації частотної залежності часу реверберації та формування заданої структури ревербераційного процесу в контрольних точках;

- звуковий контент – основним звуковим контентом для приміщень переговорних, конференц-залів, прес-центрів та залів засідань є мовленнєвий контент, а відповідно, проведення всіх етапів акустичної експертизи спрямоване на задоволення вимог ясності та розбірливості мовного матеріалу.

**Постановка задачі.** Основним завданням у роботі є розгляд методів корекції акустичних властивостей спеціальних приміщень малих обсягів з метою підвищення якості передачі мовного контенту [1-4, 8]. Під час проведення акустичної експертизи необхідно вирішити низку завдань:

1) визначити роль та послідовність проведення етапів акустичної експертизи з урахуванням особливостей приміщень;

2) виявити специфічні умови або особливі обмеження, що вплинуть на обсяг, порядок та результати проведення етапів акустичної експертизи [5-7];

3) обрати найбільш інформативні показники якісної оцінки акустики приміщення малих обсягів;

4) провести розробку рекомендацій для корекції акустичних умов з урахуванням існуючих спеціальних обмежень.

### Результати досліджень

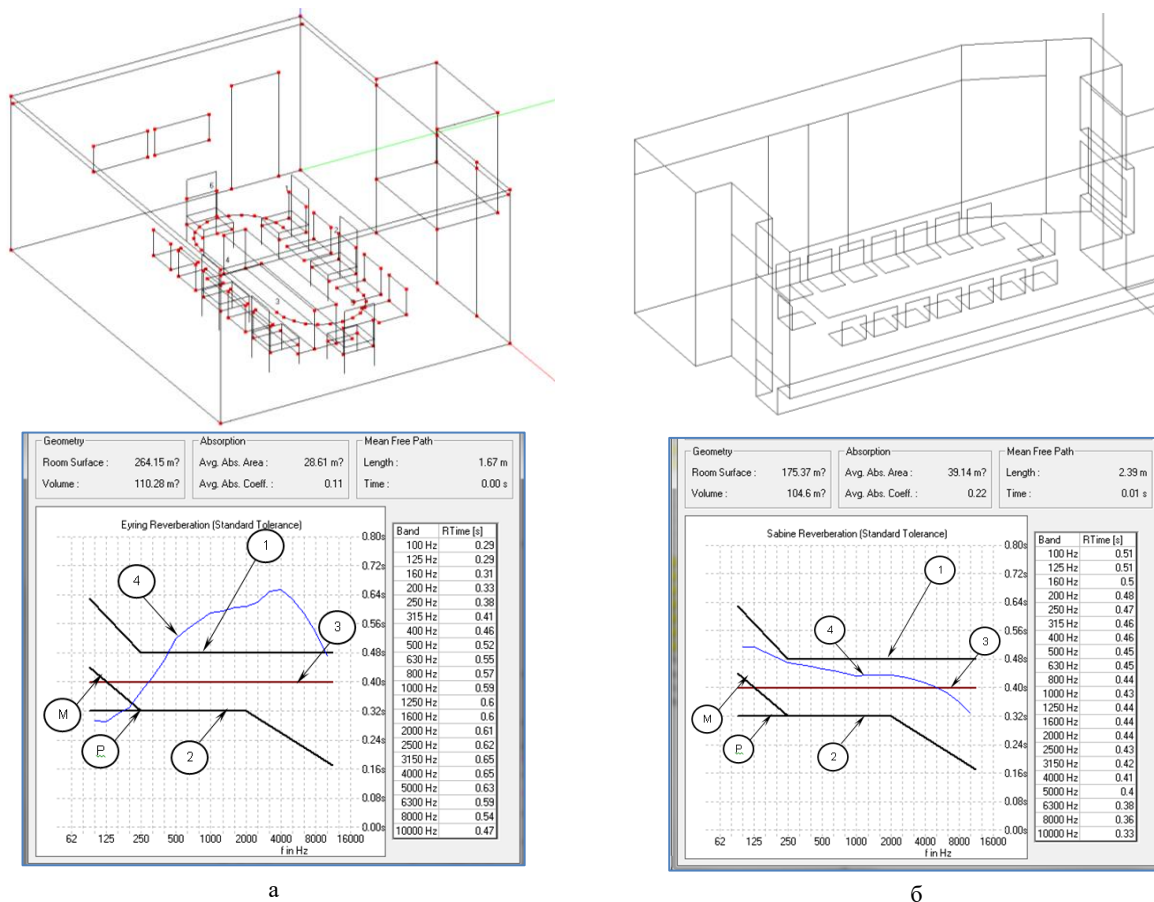
Акустична експертиза приміщень включає чотири етапи: етап перевірки існуючих архітектурно-будівельних рішень внутрішніх поверхонь приміщення; етап розробки рекомендацій з метою корекції акустичних умов та забезпечення оптимальної структури ревербераційного процесу; етап акустичного моделювання приміщення з рекомендованими оздоблювальними матеріалами та з урахуванням заходів щодо корекції акустичних умов; етап, що дозволяє провести вимірювання об'єктивних характеристик звукового поля після виконання всіх будівельних і оздоблювальних робіт, що розроблені [9-13].

**2.1. Перший етап акустичної експертизи.** На першому етапі акустичної експертизи проводиться перевірка архітектурно-будівельних рішень щодо конфігурації огорожувальних поверхонь стін та стелі в приміщеннях з використанням геометричної теорії поширення звуку в приміщенні. Основною метою перевірки є виявлення фокусуємих звукової промені поверхонь, що може призвести до істотного зниження дифузності звукового поля, а також перевірка на наявність паралельних поверхонь, що призведе до формування стійких інтерференційних картин для ряду частот  $i$ , як наслідок, появи луни, гулкості, зайвої просторовості [5, 6]. Для

приміщень (переговорних, конференц-залів, залів засідань, прес-центрів), що розглядаються, ця частина першого етапу акустичної експертизи проводиться не так, як при експертизі глядацьких залів. Для проведення цієї частини експертизи в залі для глядачів використовуються програмні модулі, що дозволяють побудувати променеві картини на планах і розрізах приміщення залу, що дає можливість перевірити геометрію стінових конструкцій на всіх поверхнях, геометрію стелі, огорож балконів і т.д. Подібна перевірка для приміщень малих обсягів не є достатньо інформативною, оскільки форма таких приміщень зазвичай має прямокутний вигляд і всі поверхні є паралельними одна одній. У таких умовах буде присутнє багаторазове перевідбиття звукових хвиль від паралельних поверхонь та утворення стоячих хвиль, що призведе до появи луни та збільшення часу

реверберації через слабку тенденцію до зниження амплітуд відображень. За рахунок малих розмірів приміщення практично немає можливості змінити геометрію поверхонь так, щоб знизити кількість паралельних поверхонь. За наявності скляних поверхонь великою площею виникає проблема розробки ефективних заходів щодо зниження амплітуд відбиття за рахунок малого коефіцієнта звукопоглинання таких поверхонь.

У перший етап акустичної експертизи також входить визначення частотної залежності часу реверберації при обробці огорожувальних поверхонь матеріалами, що запропоновані архітекторами [9-13]. На рис. 1, 2 наведені результати виконання першого етапу акустичної експертизи для приміщень малого обсягу та частотна залежність часу реверберації з вихідними матеріалами обробки поверхонь.



**Рис. 1.** Модель (а – конференц-залу, б – переговорної) в EASE 4.3 та частотна залежність часу реверберації. Допустимі межі рекомендованих значень часу реверберації: повітряний об'єм приміщення: а – 110,28 м<sup>3</sup>; б – 104,6 м<sup>3</sup>. 1 – межа максимальних значень; 2 – межа мінімальних значень; 3 – оптимальна величина RT60 (ідеальна теоретична); 4 – розрахункова величина RT60 у діапазоні частот 100÷10 000 Гц; P – для мови; M – для музики.

Для детальнішого аналізу первинних акустичних властивостей приміщення в рамках першого етапу, а також з метою виявлення "проблемних", з точки зору акустики, поверхонь у приміщенні необхідно провести аналіз структур ревербераційного процесу в контрольних точках (місцях прослуховування).

Для отримання структур ревербераційного процесу на місцях переговорів використовувався модуль Ray Tracing EASE 4.3. На рис. 2 наведено розташування контрольних точок, а на рис. 3 наведені струк-

тури ревербераційного процесу у контрольних точках № 1-4 приміщення конференц-залу (а – г) і переговорної (д – з).

Аналіз отриманих структур ревербераційних процесів у контрольних точках дозволяє провести оцінку всього ревербераційного процесу в приміщенні, оцінити тенденцію спаду звукової енергії на місцях прослуховування (контрольних точках), виявити "проблемні" з точки зору акустики приміщення поверхні та на наступному етапі акустичної експертизи враховувати висновки першого етапу.

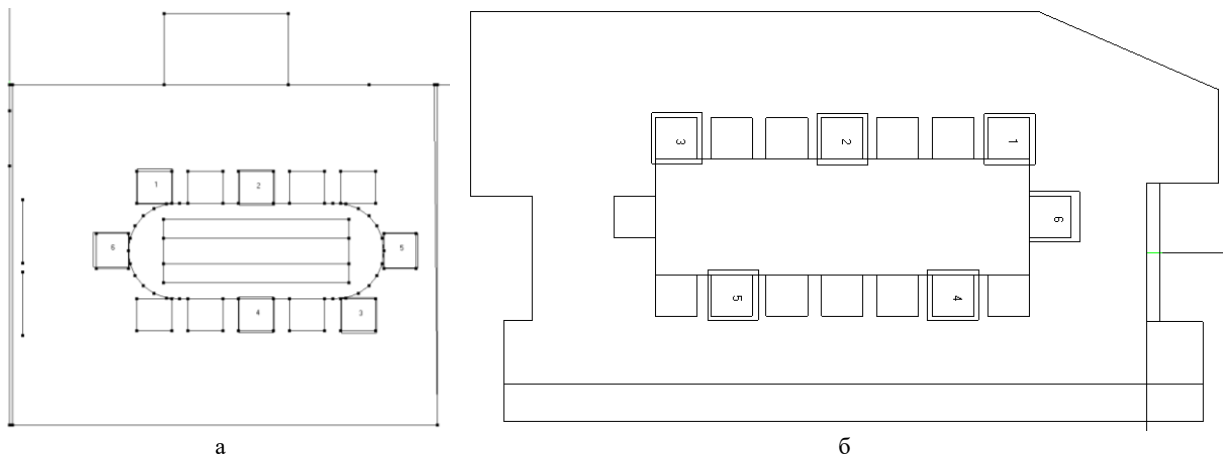


Рис. 2. Розташування контрольних розрахункових точок (КРТ) у приміщенні: а –конференц-залу; б – переговорної

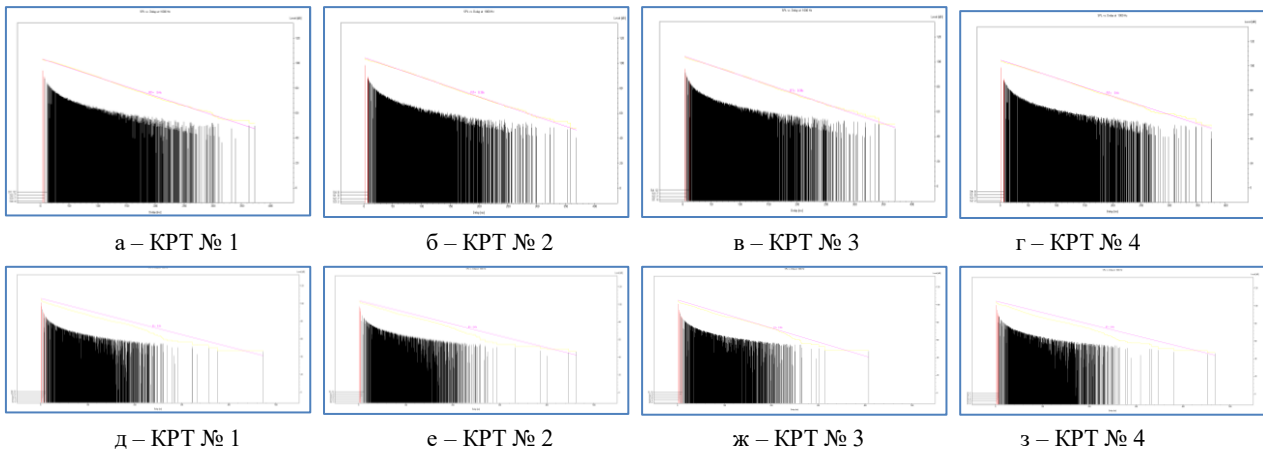


Рис. 3. Структури ревербераційного процесу в контрольних точках конференц-залу (а – г) и переговорної (д – з)

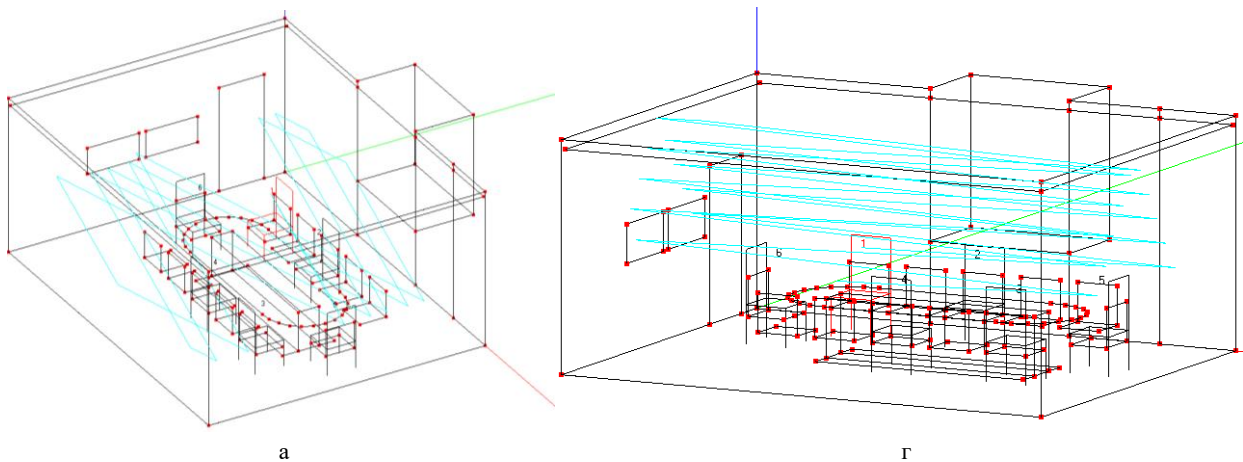
Отримані структури ревербераційних процесів у приміщеннях, що розглядаються, має загальну тенденцію, властиву саме приміщенням малих обсягів, а саме:

- спад звукової енергії відбувається досить рівномірно лише на початковій ділянці ревербераційного процесу;
- для завершальної ділянки практично не властиве зниження амплітуд відбитків, що призводить до збільшення часу реверберації, і як наслідок зниження розбірливості мовного контенту;
- наявність великої кількості відбиття в ревербераційному хвості без зниження амплітуди відбиття

свідчить про наявність багаторазових перевідбиттів від пар паралельних поверхонь (рис. 4) з малим коефіцієнтом звукопоглинання, що суб'єктивно сприймається як луна;

- для деяких контрольних точок властиво приход першого відбиття після прямого звуку практично без будь-якого запізнення (менше 10-15 мс), що призводить до суттєвих тембральних спотворень мовного матеріалу.

Аналогічні структури ревербераційних процесів виходять для малих приміщеннях складної форми, але з наявністю скляних поверхонь, що характеризуються малими коефіцієнтами поглинання.



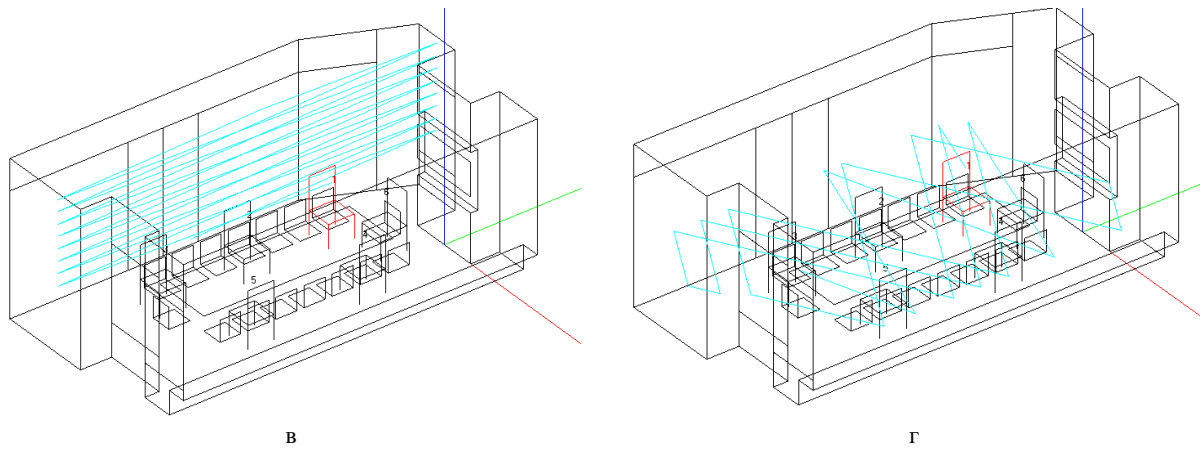


Рис. 4. Приклад багаторазових перевідбиттів, що приходять від пар паралельних поверхонь у приміщенні: конференц-залу (а, б) та переговорної (в, г)

На рис. 5 представлено приміщення переговорної складної форми з прикладом багаторазових перевідбиттів за рахунок скляних стін, і структури ревербераційних процесів в декількох контрольних точках (рис. 6).

Аналіз отриманих на першому етапі результатів дослідження акустичних властивостей залів дозволяють перейти до другого етапу акустичної експертизи за умови невідповідності вимогам до дифузності поля

у приміщенні, або невідповідності частотної залежності часу реверберації її оптимальним значенням [9-12]. Таким чином, основною відмінністю першого етапу акустичної експертизи в приміщеннях малих обсягів з використанням переважно мовного контенту, є аналіз структур ревербераційного процесу в місцях прослуховування з метою виявлення недоліків у формуванні дифузного поля.

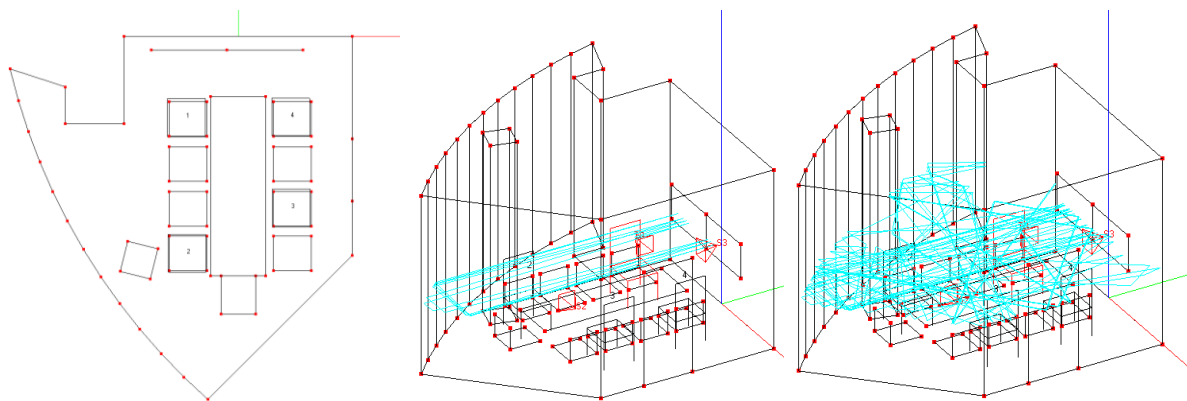
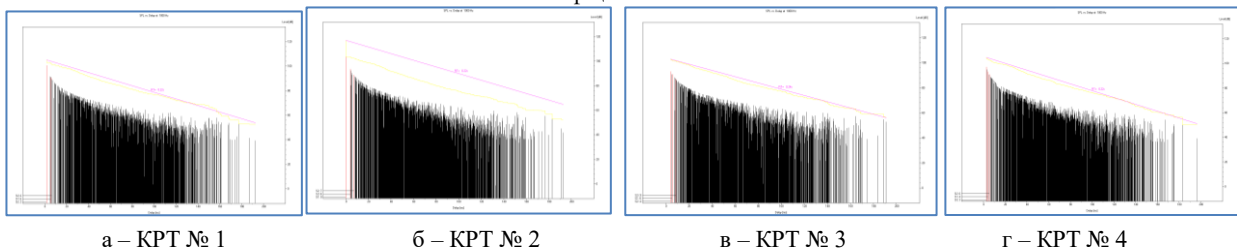


Рис. 5. План приміщення переговорної з прикладами багаторазових перевідбиттів від поверхонь з малим коефіцієнтом поглинання



а – КРТ № 1

б – КРТ № 2

в – КРТ № 3

г – КРТ № 4

Рис. 6. Структури ревербераційного процесу в контрольних точках №1-4 переговорної складної форми

**2.2. Другий етап акустичної експертизи.** На цьому етапі проводиться розробка заходів, які спрямовані на корекцію недоліків акустики приміщення, що були виявлені на першому етапі. Розробляються рекомендації з геометрії огорожувальних поверхонь для підвищення дифузності звукового поля; рекомендації щодо вибору звуковідбивних та звукопоглинаючих матеріалів, для обробки поверхонь у приміщенні, з метою оптимізації частотної залежності часу реверберації та структур ревербераційного процесу.

Так як приміщення мають невеликий об'єм, то зміна геометрії огорожувальних поверхонь не завжди можна провести через ряд причин:

- поверхні виконані зі скла та змінити форму неможливо;
- так як об'єм приміщення малий, то й розміри огорожувальних поверхонь значно менші за довжину хвилі, особливо в низькочастотному діапазоні, що призведе до того, що змінюючи геометрію поверхні, ми зможемо вносити корекцію тільки в обмежений діапа-

зон частот, де довжина хвилі буде співмірна з розмірами поверхні. Однак таке обмеження не є критичним через те, що в досліджуваних приміщеннях основним звуковим матеріалом є мовленнєвий контент, а відповідно розміри поверхонь вже будуть співмірними з частотами, що належать мовному діапазону.

Для оптимізації частотної залежності часу реверберації використовуються оздоблювальні матеріали, які працюють у мовному діапазоні частот. За наявності скляних поверхонь стін практично відсутня можливість

зміни акустичних властивостей за рахунок заміни матеріалу на них, і тоді одним із варіантів підвищення звукопоглинання скляних поверхонь є використання штор. Штори виготовляються із спеціальних "акустичних" тканин, що мають різне звукопоглинання, або з тканин, що застосовуються для виготовлення одягу сцени. На рис. 7 наведені варіанти корекції звукопоглинання скляних поверхонь у приміщеннях переговорних за рахунок використання штор різної щільності та різними коефіцієнтами звукопоглинання.

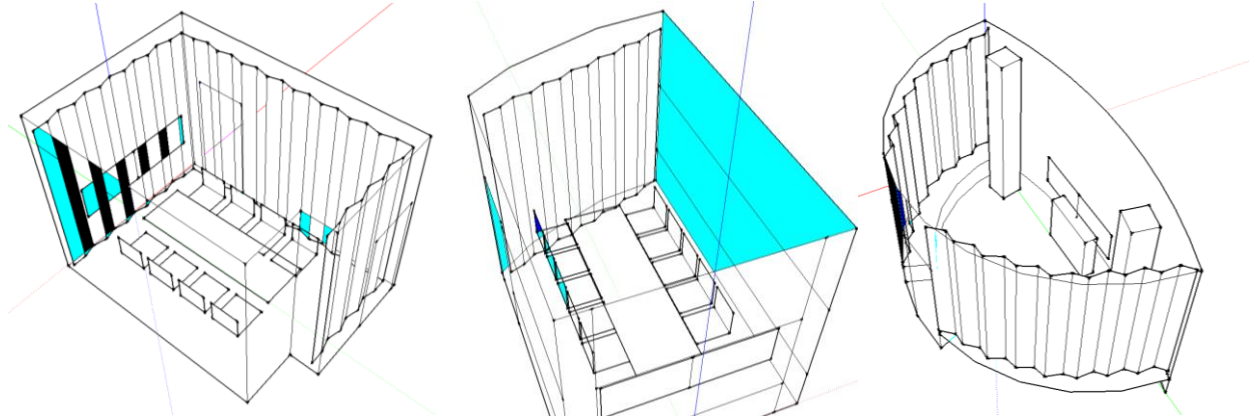


Рис. 7. Приклади корекції звукопоглинаючих властивостей скляних поверхонь стін за рахунок використання штор

На рис. 8-11 наведені приклади корекції геометрії стінових панелей у приміщеннях малих об'ємів. Основною причиною використання різних варіантів геометрії стінових панелей є спроба усунути паралельність поверхонь, що призведе до зниження ймовірності встановлення стоячих хвиль, усунення надмірно високих по амплітуді відбитків на структурі ревербераційного процесу (рис. 12), що вплине на значення часу реверберації, підвищить розбірливість та ясність мовного контенту. Залежно від розмірів приміщення

іноді можна змінити геометрію поверхні по всіх висоті поверхні, а іноді доводиться обмежуватися невеликим проміжком, що знаходиться на рівні розміщення слухачів.

Ще одним з варіантів, що застосовуються для корекції акустичних властивостей приміщень, які розглядаються, є використання додаткових підвісних стельових конструкцій типу "звукопоглинаючі стельові острови без рами" та вертикальні звукопоглинаючі панелі "Бафли" (рис. 13).

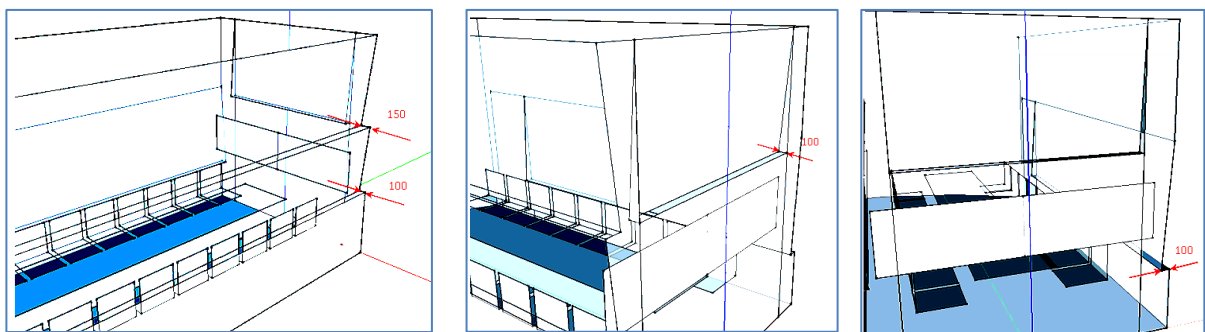


Рис. 8. Варіант корекції геометрії стінових панелей у приміщенні переговорної

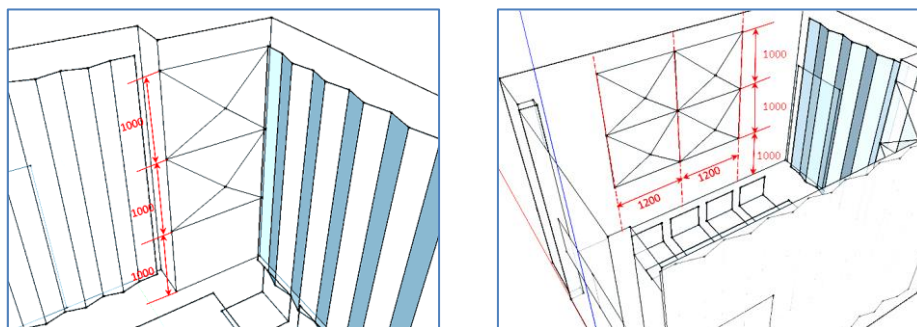
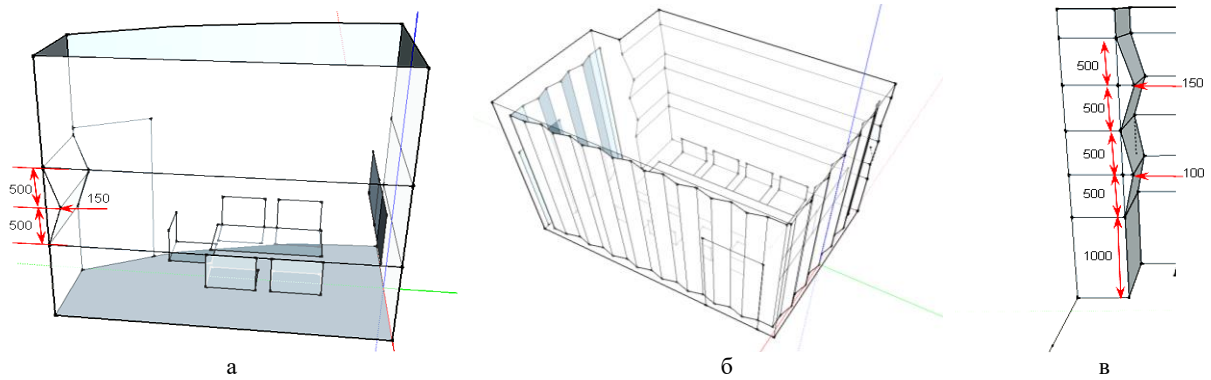
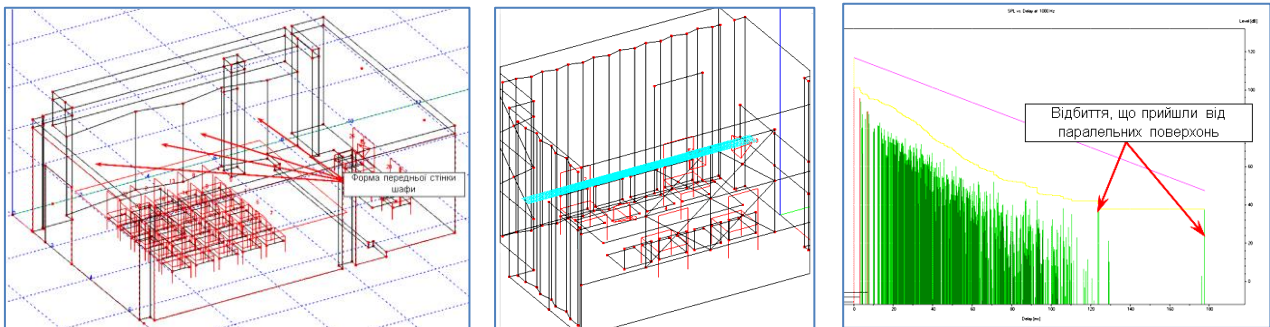


Рис. 9. Варіант корекції геометрії стінових панелей у приміщенні переговорної

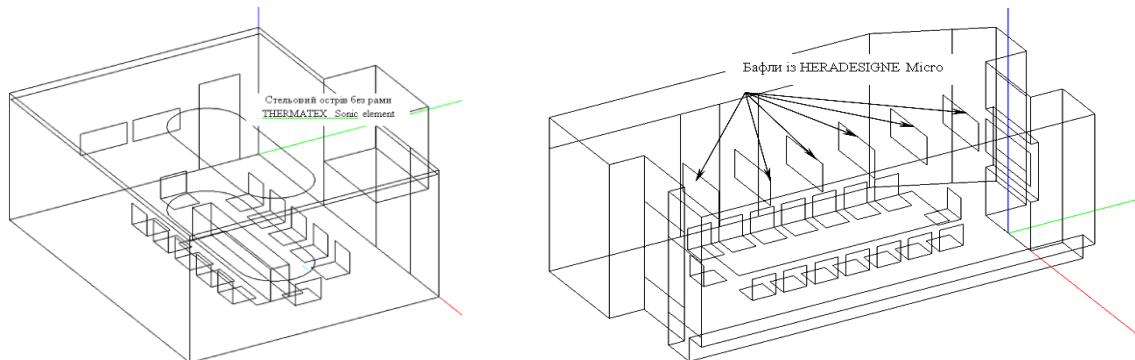


**Рис. 10.** Варіант корекції геометрії стінових панелей у приміщеннях переговорних: а – варіант зміни геометрії ділянки стіни; б – варіант зміни геометрії стін по всій висоті та довжині; в – конструкція профілю стінових панелей



**Рис. 11.** Варіант корекції геометрії передньої стінки шафи у приміщенні прес-центру

**Рис. 12.** Приклад відбиття високої амплітуди на структурі ревербераційного процесу за рахунок багаторазових перевідбиттів між паралельними поверхнями з малими коефіцієнтами звукопоглинання



**Рис. 13.** Приклади акустичної корекції з використанням додаткових стельових конструкцій

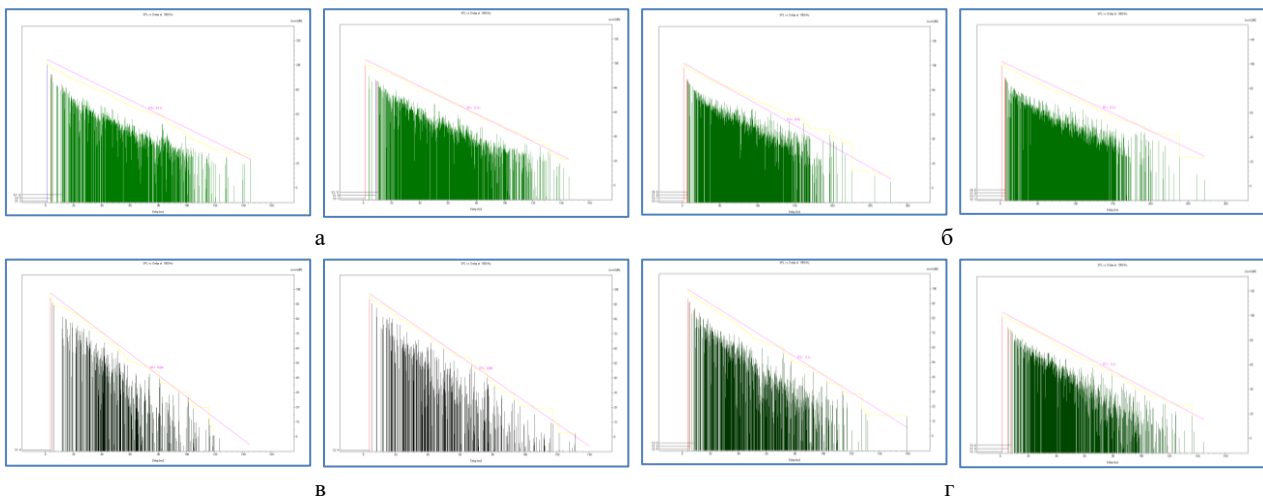
При виборі матеріалів оздоблення поверхонь у приміщеннях малих об'ємів додатковою можливістю для корекції акустичних властивостей є використання спеціальних покриттів для підлоги. Для обробки підлоги в приміщеннях переговорних, конференц-залів та прес-центрів використовуються спеціальні килимові покриття, що мають значне звукопоглинання та високі експлуатаційні характеристики. Отримані в результаті виконання другого етапу акустичної експертизи рекомендації по формі поверхонь, що огорожують, а також заходів щодо корекції звукопоглинаючих властивостей огорожувальних поверхонь є підставою для проведення моделювання акустики приміщення на третьому етапі акустичної експертизи.

**2.3. Третій етап акустичної експертизи** дає можливість: провести перевірку запропонованих на першому та другому етапах акустичної експертизи проектних рішень щодо геометрії стінових та стельових панелей; проаналізувати частотну залежність

часу реверберації з використанням матеріалів оздоблення приміщень, запропонованих на другому етапі; провести аналіз структур ревербераційних процесів у контрольних точках.

Оцінку ефективності розроблених рекомендацій щодо корекції акустичних властивостей приміщення можна провести як по частотній залежності часу реверберації, так по отриманих структурах ревербераційних процесів в контрольних точках. На рис. 14 наведені структури ревербераційних процесів після застосування всіх рекомендацій щодо зміни геометрії поверхонь та використання спеціальних матеріалів обробки огорожувальних поверхонь. Аналіз отриманих структур ревербераційних процесів дозволяє зазначити, що загальна тенденція спаду щільності енергій відбиття має рівномірний вигляд без надлишку та нестачі відбиттів на всьому проміжку ревербераційного процесу; відбиття мають тенденцію до рівномірного спаду амплітуди відбитих сигналів.





**Рис. 14.** Структури реверберационного процесу в контрольних точках №1-2 (рис. 13): а – переговорної наявності штор на скляних поверхнях; б – конференц-залу після застосування стельових островів без рами; в – переговорної після зміни профілю стінових конструкцій (рис. 10, б); г – переговорної після використання "Бафлів"

Також перші ранні відображення приходять із достатнім запізненням, що не призведе до тембрального спотворення мовного контенту; у реверберационному "хвості" не спостерігаються відбиття з досить великою амплітудою, а отже відсутня луна; – реверберационний процес не містить будь-яких додаткових тенденцій для ряду відбиттів, що надходять від паралельних поверхонь. Обсяг та алгоритм проведення третього етапу акустичної експертизи для приміщень малих обсягів не зазнає істотних змін порівняно з аналогічними етапами, що проводяться для приміщень залів для глядачів.

**2.4. Четвертий етап акустичної експертизи.** Результатами завершального етапу акустичної експертизи є характеристики звукового поля, що виміряні в контрольних точках приміщення після завершення всіх будівельних та оздоблювальних робіт. Для проведення вимірювань авторами використовують апаратно-програмний комплекс на базі Easera 1.1.3 [13]. Отримані значення ясності ( $C_7$ ,  $C_{50}$ ,  $C_{80}$ ), просторовості, розбірливості (Alcons, STI, RaSTI), часу реверберації ( $T_{10}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ ) дають можливість аналізу та пере-

вірки прийнятих рішень всіх трьох етапах проведення акустичної експертизи. Для приміщення малих обсягів з використанням переважно мовного контенту четвертий етап не має додаткових обмежень або специфічних особливостей у проведенні [12].

## Висновки

Авторами у статті розглянуто особливості формування оптимальних акустичних умов у приміщеннях, що характеризуються малим обсягом та використанням здебільш мовного контенту. Розглянуто всі чотири етапи акустичної експертизи на прикладах переговорних приміщень, конференц-залів, прес-центрів. Етапи проведення акустичної експертизи в цих дослідженнях не змінили своєї послідовності, проте зазнали змін в обсягах деяких етапів, за рахунок існуючих особливостей приміщень, а також зазнали змін інформативні критерії, за якими проводився аналіз дифузності звукового поля.

Авторами ведуться дослідження методів формування оптимальних акустичних умов у студійних приміщеннях в межах акустичної експертизи.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ (REFERENCES)

1. Russo D., Ruggiero A. Choice of the optimal acoustic design of a school classroom and experimental verification. *Applied Acoustics*. 2019. Vol. 146. P. 280-287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.11.019>.
2. Barteld N. J. Postma S. J., Brian F. G. Katz. Pre-Sabine room acoustic design guidelines based on human voice directivity. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2018. №143. P.2428-2437.
3. Young-JiChoi. Predicting classroom acoustical parameters for occupied conditions from unoccupied data. *Applied Acoustics*. 2017. Vol. 127. P. 89-94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.05.036>
4. Michael H. Denison, Brian E. Anderson. Time reversal acoustics applied to rooms of various reverberation times. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2018. Vol.144(6). 3055. DOI: [10.1121/1.5080560](https://doi.org/10.1121/1.5080560)
5. Щиржецкий Х. А., Борисов Л. А. Акустика зальных помещений. *Сцена*. 2002. №2. С. 21.
6. Анерт В., Стефен Ф. Техника звукоусиления. Теория и практика / пер. с англ. М: ООО «ПКФ Леруша». 2003. 416 с.
7. Алдошина И.А., Вологдин Э.И., Ефимов А.П., Катунин Г.П. Электроакустика и звуковое вещание : Учеб. пособие для вузов. Горячая линия, Телеком. 2007. 872 с.
8. Ronald Freiheit, Matthew T. Neal. Architectural acoustics: From concert halls to classrooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2018. Vol. 143, 1735. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.5035660>.
9. Усик В. В., Мягкий И. Г. Особенности проведения акустического моделирования, как завершающего этапа акустической экспертизы помещений зрительных залов на примере драматического театра на 500 мест. *Сборник "Радиотехника"*. №191/2017. Харьков. 2017. С. 203-211.
10. Порошин С. М., Усик В. В. Методика проведения акустической экспертизы и архитектурно-строительных решений для зрительных залов на примере драматического театра на 500 мест. *Сборник научных трудов VI Межд. РЭФ "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ – 2017)*. Харьков, 2017. С. 125-130.

11. Порошин С. М., Усик В. В. Методология оценки акустических свойств помещений зрительских залов. *World Science*. 2018. Vol.1. № 1(29), С.8-15.
12. Усик В. В., Беликов И. С. Особенности применения методологии оценки акустических свойств помещения на примере пресс-центра. *Науково-технічний журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті"*. 2019. № 1. с. 25-37 DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.voi1.158805>.
13. Poroshin S., Usik V., Butova O. Features of the application of the methodology for assessing the acoustic properties of the sound field for spectator rooms. *XXIX International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance 2019 (MMA 2019) Sozopol*, 2019. PP. 145-149. DOI: <https://doi.org/10.1109/MMA.2019.8936027>.

Received (Надійшла) 17.09.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.11.2021

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Порошин Сергій Михайлович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри мультимедійних інформаційних технологій і систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;  
**Sergei Poroshin** – Doctor of Sciences, Professor, Head of the department of multimedia information technologies and systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [poroshin0020@gmail.com](mailto:poroshin0020@gmail.com), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2583-9916>

**Усик Вікторія Валеріївна** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри мультимедійних інформаційних технологій і систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;  
**Victoriya Usik** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, professor Department of multimedia information technologies and systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [usik.viktorya@gmail.com](mailto:usik.viktorya@gmail.com), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3515-4849>.

**Беликов Ігор Сергійович** – старший викладач кафедри мультимедійних інформаційних технологій і систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;  
**Ihor Bielikov** – senior teacher Department of multimedia information technologies and systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [igorajon@gmail.com](mailto:igorajon@gmail.com), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1339-8401>.

#### Методы формирования оптимальных акустических условий для передачи речевого контента в помещениях малых объемов

С. М. Порошин, В. В. Усик, И. С. Беликов

**Аннотация.** Предметом исследования в статье является методология проведения экспертизы помещений малых объемов с преобладанием речевого контента. Целью работы является анализ всех этапов проведения акустической экспертизы для помещений переговорных, конференц-залов, пресс-центров, определение объемов и последовательности проведения этапов, с учетом специфических ограничений и условий, возникающих в помещениях малых объемов. В работе рассмотрены все этапы акустической экспертизы на примерах реальных помещений переговорных, конференц-залов, пресс-центров. Последовательность этапов экспертизы, при ее проведении для помещений малых объемов не претерпела изменений, по сравнению с последовательностью, которая используется для зрительских залов. Основной отличительной особенностью при проведении первого этапа акустической экспертизы в помещениях малых объемов с преобладанием речевого контента является анализ структур реверберационного процесса в местах прослушивания с целью выявления недостатков формирования диффузного поля, вместо работ по проверке геометрии ограждающих поверхностей стеновых и потолочных панелей, проводимой с использованием геометрической теории. Особенностью второго этапа является разработка рекомендаций для повышения звукопоглощающих свойств ограждающих поверхностей и устранению эффекта многократных переотражений звуковой энергии между параллельными поверхностями за счет использования частичной замены геометрии поверхностей, работы с подвесными потолочными конструкциями и использовании звукопоглощающих штор (для коррекции свойств стеклянных поверхностей). Третий и четвертые этапы экспертизы остались неизменными.

**Ключевые слова:** акустическая экспертиза; этапы акустической экспертизы; структура реверберационного процесса; оптимальные акустические условия.

#### The methods for the formation of optimal acoustic conditions for the transmission of speech content in small rooms

Sergei Poroshin, Victoriya Usik, Ihor Bielikov

**Annotation.** The subject of research in the article is the methodology for the examination of small-volume premises with a predominance of speech content. The aim of the work is to analyze all stages of acoustic expertise for meeting rooms, conference rooms, press centers, to determine the volume and sequence of the stages, taking into account the specific restrictions and conditions that arise in small rooms. All stages of acoustic expertise are considered in the work on examples of real premises of meeting rooms, conference halls, press centers. The sequence of stages of the examination, when it was carried out for premises of small volumes, did not undergo any changes, compared to the sequence that is used for spectator halls. The main distinctive feature of the first stage of acoustic examination in small rooms with a predominance of speech content is the analysis of the structures of the reverberation process in listening places in order to identify the drawbacks of the formation of a diffuse field, instead of checking the geometry of the wall and ceiling panel walls using geometric theory. A feature of the second stage is the development of recommendations for improving the sound-absorbing properties of enclosing surfaces and eliminating the effect of multiple re-reflections of sound energy between parallel surfaces through the use of partial replacement of surface geometry, work with suspended ceiling structures and the use of sound-absorbing curtains (to correct the properties of glass surfaces). The third and fourth stages of the examination remained unchanged.

**Keywords:** acoustic examination; stages of acoustic examination; the structure of the reverberation process; optimal acoustic conditions.

Valerii Chystov<sup>1</sup>, Iryna Zakharchenko<sup>1</sup>, Vladislava Pavlenko<sup>2</sup>, Maksim Pavlenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup> Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

## A METHOD FOR CHOOSING A STRATEGY FOR THE BEHAVIOR OF A CELLULAR AUTOMATON WHEN SOLVING THE PROBLEM OF FINDING TARGETS BY A GROUP OF MOVING OBJECTS

**Abstract.** Currently, a large number of different mathematical models and methods aimed at solving problems of multidimensional optimization and modeling of complex behavioral systems have been developed. One of the areas of search for solutions is the search for solutions in conditions of incomplete information and the need to take into account changing external factors. Often such problems are solved by the method of complete search. In some conditions, the method of complete search can be significantly improved through the implementation and use of behavioral models of natural formations. Examples of such formations can be group behavior of insects, birds, fish, various flocks, etc. The idea of copying group activity of a shoal of fishes at the decision of problems of joint activity on extraction of food is used in work. The reasoning based on the simulation of the behavior of such a natural object allowed to justify the choice as a mathematical model - cellular automata. The paper examines the key features of such a model. Modeling of his work is carried out, strategies of behavior of group of mobile objects at search of the purposes are developed, key characteristics are investigated and the method of adaptive choice of strategy and change of rules of behavior taking into account features of the solved problem is developed. The search strategy is implemented in the work, which takes into account the need to solve the optimization problem on two parameters. The obtained results testify to the high descriptive possibility of such an approach, the possibility of finding the optimal strategy for the behavior of the cellular automaton and the formalization of the process of selecting the parameters of its operation. A further improvement of this approach can be the implementation of simulation to study the properties of the developed model, the formation of the optimal set of rules and parameters of the machine for the whole set of tasks.

**Keywords:** cellular automaton; path search; optimization problem; random search; model.

### Introduction

Solving real problems using some kind of mathematical apparatus often takes a lot of time to select the optimal parameters. In addition, difficulties arise in assessing the influence of various factors on the effectiveness of solving each specific problem. In [16], an approach to solving the problem of searching for targets by a group of moving objects was proposed. It was based on a mathematical model of a cellular automaton. However, in [16], the issues of optimization of the solution time and selection of the optimal parameters of the cellular automaton operation for solving the problem of finding targets were not investigated.

This makes a more detailed consideration of the proposed model, the study of its properties and the search for ways to improve to expand the range of tasks to be solved, urgent. It is also important to formalize the process of choosing a strategy for the behavior of a cellular automaton when solving the problem of searching for a group of moving objects.

**Analysis of recent research and publications.** A significant amount of work has been devoted to the study of the motion of objects and their interaction. The author of [2] divides the existing methods of searching for routes of moving objects into three classes: exact, classical heuristic and metaheuristic methods.

Exact methods are of interest in the development and testing of optimal algorithms. But to solve practical problems are not used due to the rapid growth of computational complexity with increasing dimension of the problem.

Heuristic methods are to search in a relatively limited space of solutions and ensure finding close to

optimal solutions in a reasonable time. Metaheuristic methods are based on a careful study of the most promising parts of the solution space [3] on some grounds. However, they contain a large number of parameters that must be configured for each specific task [4]. Therefore, metaheuristic methods form the basis of modern research in the field of approximate methods of solution [2]. Metaheuristic methods based on mechanisms found in wildlife are especially often used to solve optimization problems, which include the problem of finding routes. Such methods and models are called bioalgorithms. Among them are cellular automata, which due to natural parallelism, simplicity and universality allow to model the behavior of various systems, objects and phenomena of any nature [5].

The operation of the apparatus of cellular automata is described in detail in [5, 7, 8]. Examples of their use to solve optimization problems prove their effectiveness. Thus, in the article [9] on the basis of cellular automata the behavior of the crowd is modeled taking into account the mental characteristics of pedestrians. In [10] a cellular-automatic approach to modeling the behavior of transport and pedestrians is described.

The search for optimal routes of movement using the apparatus of cellular automata is also carried out in the article [11]. However, this paper considers the motion of objects in two-dimensional space for homogeneous single objects. This does not allow their use and requires refinement of the developed model. It is necessary to take into account the limitations and features of the tasks of forming a search in a given area.

Substantiation of the possibility of applying the cellular-automatic approach to solving the problem of the salesman is given in [5].

In [13], an example of successful use of cellular automata to solve the problem of finding routes for moving cars from wholesale bases to outlets is given. However, this approach can be applied only in the presence of a road network and a clearly defined task of a salesman for these conditions. This does not allow to use such an approach to solving the problem of determining the route of movement, for example, search groups.

In [14], the use of routing algorithms for determining the optimal routes of strike aircraft flights is proposed. However, this approach is characterized by high computational complexity and rough partition of space with different properties.

The analysis shows the successful use of cellular automata to solve the problem of finding objects in the area. In [our article], a method for studying the behavior of a group of moving objects using a cellular automaton is proposed. However, the article does not consider its characteristics, does not identify ways to optimize it and possible sets of rules (strategies) of its behavior. This requires further research.

**The purpose of the article** is to develop a method for selecting a strategy for the behavior of the cellular automaton in solving the problem of finding targets by a group of moving objects.

**Presenting main material**

In continuation of the idea presented in [16], we will consider as the initial model of a group of moving objects - a shoal of fish with appropriate properties [15].

In works [11-13] for problems of the considered class it is offered to use the cellular automaton on the plane corresponding to the solved problem. Then, a two-dimensional cellular automaton can be defined as a set of finite automata on a plane with coordinates that can be in one of the possible states [7, 8, 11, 13]:

$$\theta_{i,j} \in S \equiv \{0,1,2,3,\dots,k\}. \tag{1}$$

At each step of the automaton changes the state of the automaton in accordance with the rule:

$$\theta_{i,j}(t+1) = \phi(\theta_{k,l}(t) | (k,l) \in N(i,j)), \tag{2}$$

where  $N(i,j)$  - automaton environment  $(i,j)$ .

In this paper we use the definition of the environment of the automaton as Moore's environment [11]:

$$N_M(i,j) = \{k,l | |i-k| \leq 1, |j-l| \leq 1\}. \tag{3}$$

The number of possible transition rules is determined by the number of possible states  $\theta$  and the number of neighbors under consideration  $m$ . Theoretically, the number of such rules can be equal to  $\Psi = \theta^m$ . This allows you to build different sets of rules for constructing different behavioral strategies of the cellular automaton.

Analysis of formulas (2), (3) shows that with the help of rules can be described quite complex cell behavior. A large number of possible states can also be

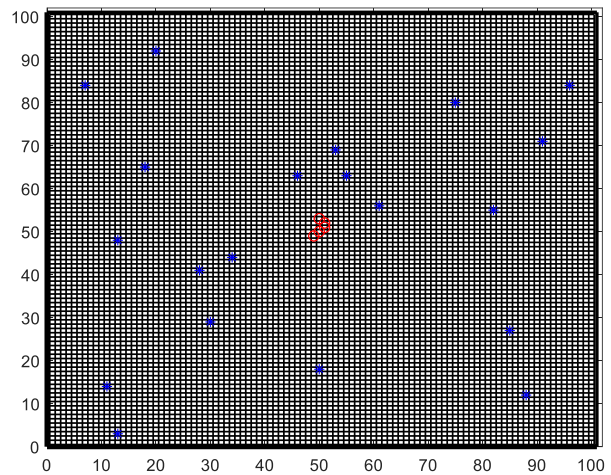
considered. Consider the given formal descriptions in practice.

Define a homogeneous two-dimensional grid with coordinates on the plane (Fig. 2). This grid is usually folded into a sphere, ie the "lower" edge of the grid joins the "upper" and the "left" edge with the "right". This convolution is usually used for ease of calculation and to avoid the associated problems [8]. However, in this example, it is proposed to use a limited lattice with boundaries (an example is shown in Figure 1).

Given the rules of development of the cellular automaton, we will use two types of automata for the search task: search objects and search group (Fig. 3a and 3b, respectively).

As a basis for finding the rules of behavior of the cellular automaton, we use the strategy of joint movement of the group to the goal.

We use the simplest model of behavior: the machine moves to the goal - the object that is closest to the group.



**Fig. 1.** Two-dimensional homogeneous grid for the operation of the cellular automaton Source: developed by the authors using the developed model

In Fig. 1, asterisks indicate objects - search targets, and circles - the composition of a group of search objects.

Based on the strategy of behavior "movement to the nearest goal", we can formulate the following rules of behavior of the cellular automaton:

**Strategy 1.**

1. Search objects do not move. Objects are defined by a set  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ , each object has coordinates  $c_k(x_i, y_j)$ .

2. The search team

$$O = \{o_1, o_2, \dots, o_g\}, o_g(x_i, y_j)$$

moves in unison, without changing its structure.

3. At each step of the cellular automaton, the automaton of the search group changes its position.

4. All calculations are performed relative to the center of gravity of the group, determined by the formula:

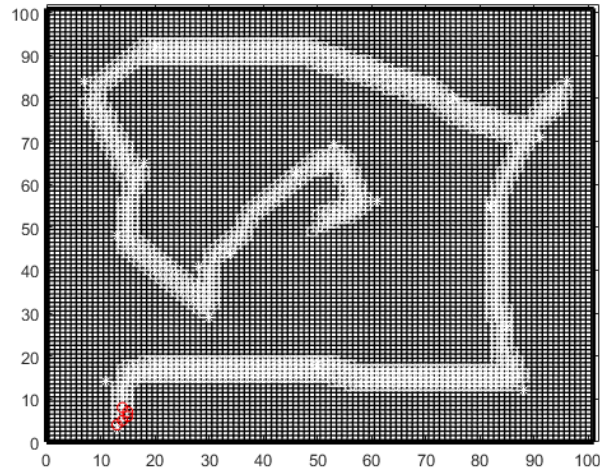
$$O_{CG}(x, y) = \left( \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L x_l, \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L y_l \right), \quad (4)$$

where  $(x_l, y_l)$  - the coordinates of cellular automata belonging to the search group.

5. Search group machines can determine the distance to targets relative to the center of gravity of the group.

6. The search group machine moves to the nearest object.

Using this strategy for the operation of the cellular automaton, the following results were obtained (Fig. 2).



**Fig. 2.** The results of the cellular automaton operation according to the strategy of movement to the nearest purpose.  
Source: developed by the authors using the developed model

Analysis of the results of the machine showed that the machine coped with the specified work in 342 steps of the machine.

However, this is not the only possible strategy for the machine.

As the next strategy we will consider movement to the most massive (important) purpose. In this case, it is assumed that for each purpose is assigned a value of mass or weight. This is a conditional concept and for a practical task, this concept may have the necessary meaning and semantic description, characteristic of the task.

In this case, the system of rules will look like this.

**Strategy 2.**

Items 1-5 are equivalent to the strategy points of the machine above.

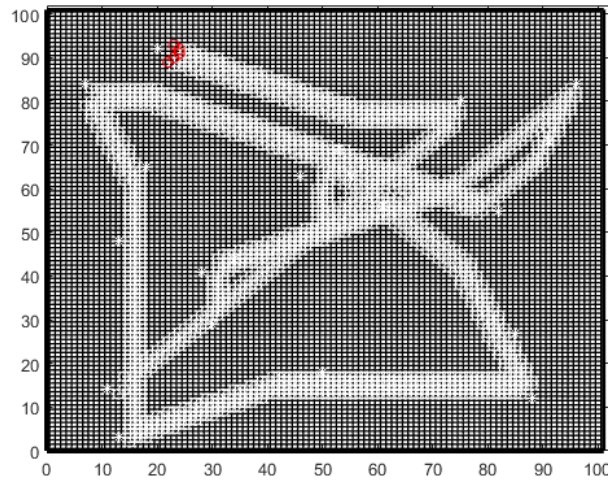
6. The search engine has information about the "importance" of the object.

7. The search engine moves to the most "important" goal.

The implementation of this strategy allowed to obtain the results shown in Fig. 3.

The machine allowed to get this result in 514 steps.

As you can see from Fig. 3, this machine finds unsuccessful solutions. They implement an energy-intensive path with a large number of re-visits to the same areas.



**Fig. 3.** The results of the cellular automaton operation according to the strategy of movement towards the most "important" purpose.  
Source: developed by the authors using the developed model

Then we can conclude that the use of such a strategy is possible on a limited number of objects or in the absence of other alternatives.

Consider the following strategy - mixed. It is based on the idea of moving to the closest and "important" object.

Formally, this machine can be set by such a system of rules.

**Strategy 3.**

Rules 1-5 will be identical to the rules for the first machine.

6. The function of significance of the object is calculated, which connects the distance from the object to the center of the search group and its mass.

Formally, this function can be set as follows:

$$f(c_{ij}, O_{CG}) = \left( 1 - \frac{L_{c_{ij}}}{L_{\max}} \right) + \frac{m_{c_{ij}}}{m_{\max}},$$

where  $L_{c_{ij}}$  - distance from the target  $c_{ij}$  to the center of the search group  $O_{CG}$  ;

$L_{\max}$  - the maximum distance from all targets  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$  to the center of the search group  $O_{CG}$  ;

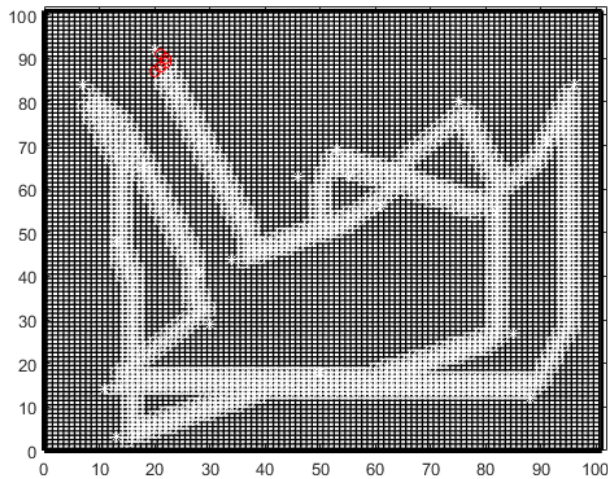
$m_{c_{ij}}$  - the "importance" of the target  $c_{ij}$  ;

$m_{\max}$  - maximum "importance" of targets  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$  .

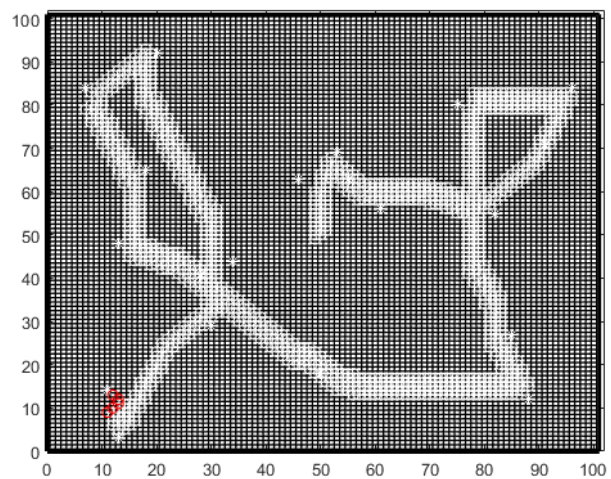
7. The machine moves to the target, which has the maximum value of the function  $f(c_{ij}, O_{CG})$ .

This system of rules allowed to obtain the following results of the machine (Fig. 4).

To the surprise of the authors, this machine has completed its work in 555 steps. Analysis of the results suggests that the end result is little different from the machine, which took into account only the "importance".



**Fig. 4.** The results of the cellular automaton operation according to the strategy of movement towards the closest and "important" purpose.  
Source: developed by the authors using the developed model



**Fig. 5.** The results of the cellular automaton operation according to the strategy of movement to the closest and "important" purpose in the cluster.  
Source: developed by the authors using the developed model

The path seems less chaotic. However, the machine often moved in the same areas many times.

Thus, this machine can not be applied to a large number of purposes and has a limited scope.

Analysis of all the results shows that very often the machines pass close to the target. But they do not visit it because of certain behavioral strategies. Expanding the "vision" of the machine does not significantly improve the results.

However, field analysis showed that it would be interesting to visit nearby objects in a limited area of space and then move to the next area.

This approach can be a dynamic clustering of the search space associated with the center of the search group.

Under the cluster we mean the area of space around the center of mass of the search group radius  $R$ .

Then it is possible to imagine a model of this machine with such a set of rules.

#### Strategy 4.

Rules 1-5, as in other machines.

6. Define objects that fall into the cluster of radius  $R$ .

7. The function of significance of the object is calculated, which connects the distance to the object to the center of the search group and its mass.

8. The machine moves to the target, which has the maximum value of the function  $f(c_{ij}, O_{CG})$ .

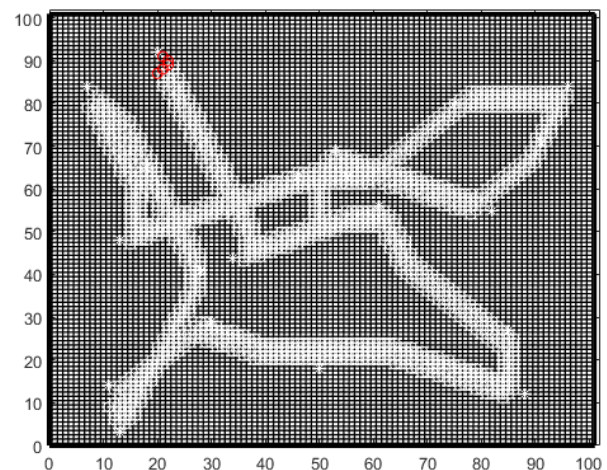
9. If there are no targets in the cluster, there is a movement to the next cluster.

Then we obtain the following results of this machine (Fig. 5).

This result was obtained for  $R = 25$ . The number of implemented steps of the machine was 355. This number of steps can be compared with the machine in Fig. 1.

However, instead of one parameter - range, it takes into account 2 interrelated parameters - distance and "importance".

Fig. 6 shows the machine with  $R = 50$ . The number of implementation steps was 355.



**Fig. 6.** The results of the cellular automaton operation on clusters.  
Source: developed by the authors using the developed model

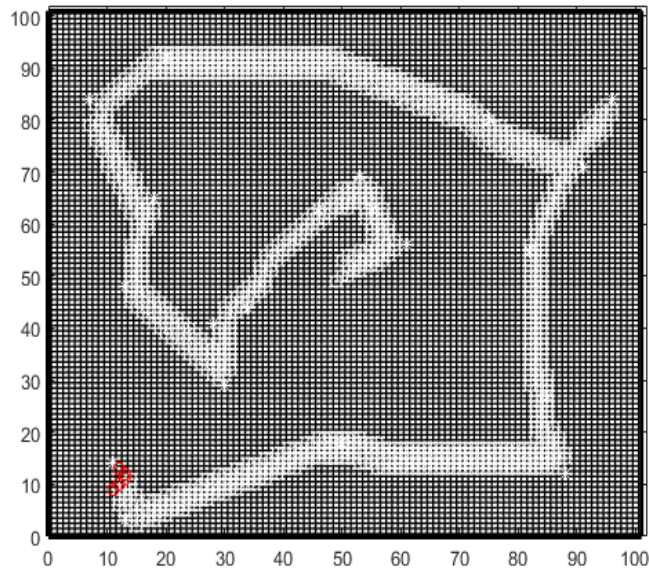
As a result of setting the parameters of the machine, namely the change and selection of values  $R$ . It was possible to reduce the number of steps of the machine to 338. At the same time  $R = 20$ . The results of the machine are presented in Fig. 7.

The results obtained are almost identical to those shown in Fig. 1. However, formally the number of steps of the machine was 342 in the first case and 338 in the latter. The optimization was carried out on two components - "importance" and distance.

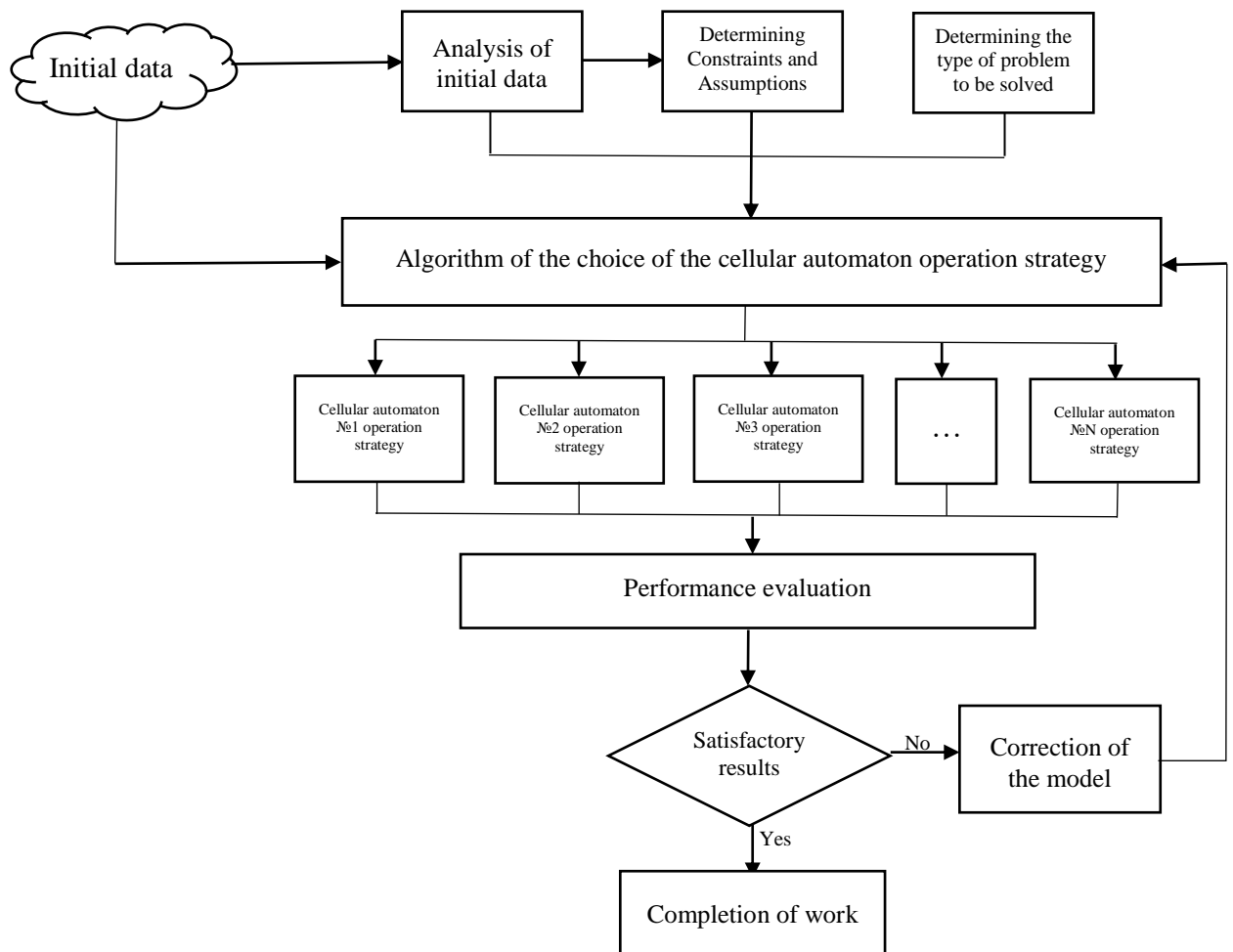
The obtained results indicate the prospects of this area of research and the great potential. However, the question of the method of selecting a cellular automaton that implements a certain strategy remains unresolved. Studies of the properties of the developed cellular automaton indicate the need for large-scale

statistical modeling of this automaton. Its purpose is an unambiguous choice of parameters of its work. However, the impact on the results of the number of goals, their characteristics, search tasks, time and resource constraints.

Based on these considerations, we can propose an adaptive method for selecting parameters and behavioral strategies of the cellular automaton in solving the problem of finding targets by a group of moving objects, shown in Fig. 8.



**Fig. 7.** Results of the cellular automaton operation on clusters with optimal parameters.  
*Source:* developed by the authors using the developed model



**Fig. 8.** The structure of the parameter selection method and the proceeding strategy of the cellular automaton when solving the problem of finding purpose by a group of moving objects

This approach will allow you to develop a decision support system for the management of a group of moving objects.

It is adaptable both to external conditions and to features of the solved tasks. It can also be used to obtain results and evaluate a wide range of possible alternatives.

Conclusions. Studies of the cellular automaton for finding targets by a group of moving objects suggest that this problem can be successfully solved. The use of a cellular automaton allows you to implement a wide range of search strategies.

Modeling of the machine showed that additional research is needed on the selection of operating parameters and rules for changing the state of objects. In

the future it is necessary to simulate his work. Its purpose is to identify patterns of formation of the parameters of the machine and adjust the rules of its operation to increase the speed and accuracy of the task. Similarly, in the future it is necessary to take into account the resource of the search group to move and take into account the dynamic change in the characteristics of the goals.

The results of modeling the operation of the cellular automaton and evaluation of the dynamic characteristics of the work can be studied by following the link provided in the form of a QR-code.



#### REFERENCES

1. Pozhidaev, M.S. (2010), *Algorithms for solving the problem of transport routing* [Algoritmy resheniya zadachi transportnoy marshrutizatsii], dissertation, Tomsk: Tomsk State University, 2010, 136 p., available at : <https://marigostra.ru/materials/thesis.pdf>.
2. Slastnikov, S.A. (2014). "Application of metaheuristic algorithms for the transport routing problem [Primeneniye metaevristicheskikh algoritmov dlya zadachi transportnoy marshrutizatsii]", *Economics and Mathematical Methods*, Vol. 1, pp. 117–126.
3. Matsyuk, N.O. (2013), "Features of solving the problem of a salesman for wholesalers [Osoblyvosti rozv'yazannya zadachi komivoyazhera dlya pidpryemstv hurtovoyi torhivli]", *Bulletin of the KhNU*, Vol. 5, pp. 95–100.
4. Bjarnadottir, A.S. (2004), *Solving the Vehicle Routing Problem with Genetic* / Aslaug Soley Bjarnadottir, Technical University of Denmark, 127 p.
5. Li, Yang. (2019), A review of cellular automata models for crowd evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 526 p.
6. Aladiev, V.Z. (2009), *Classic homogeneous structures. Cellular automata* [Klassicheskiye odnorodnyye struktury. Kletochnyye avtomaty], Publishing house Fultus Books, 535 p.
7. Bandman, O.L. (2005), "Cellular-automatic models of spatial dynamics [Kletochno-avtomatnyye modeli prostranstvennoy dinamiki]", *System informatics*, Vol. 10, pp. 57–113.
8. Toffoli, T. and Margolus, N. (1991), *Cellular automata machines*, 280 p..
9. Makarenko, O.S. (2010), „Modeling the movement of pedestrians on the basis of cellular automata [Modelyuvannya rukhu pishokhodiv na osnovi klitynnykh avtomativ]”, *System research and information technologies*, Vol. 1, pp. 100–109.
10. Babaei, Abdorreza, Homayun, Motameni, and Rasul, Enayatifa (2020), "A new permutation-diffusion-based image encryption technique using cellular automata and DNA sequence", *Optik*, 203: 164000.
11. Pavlenko, M.A. (2014), "Method of solving the problem of laying routes when controlling the movement of an air object [Metod reshenyia zadachy prokladky marshrutov pry upravleni dyvzhenyem vozdušnoho ob'ekta]", *Information processing systems*, Vol. 5, pp. 87–90.
12. Matsyuk, N.O. (2016), "Solving the routing problem using a modified ant-cell-automatic algorithm [Rozv'yazannya zadachi marshrutyzatsiyi z vykorystannyam modyfikovanoho murashyno-klitynno-avtomatnoho alhorytmu]", *Visnyk ekonomichnoi nauki Ukrainy*, Vol. 1, pp. 49–54.
13. Zhykharevych, V.V. (2016), "Cellular-automatic approach to solving the problem of routing wholesale trade enterprises taking into account the transport infrastructure of the region [Klitynno-avtomatny pidkhid do rozv'yazannya zadachi marshrutyzatsiyi optovykh torhovel'nykh pidpryemstv iz urakhuvannyam transportnoyi infrastruktury rehionu]", *Visnyk ekonomichnoi nauki Ukrainy*, Vol. 2, pp. 69–73.
14. Khmelevskiy, S., Pavlenko, and Petrov, O. (2020), "Information analysis method about current situations in ACS of special operations", *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 1, pp. 103-106, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.15>
15. Burova, E.M. (2020), "Heuristic algorithm for finding shoals of fish [Evristicheskiy algoritm poiska kosyakov ryb]", *Electronic Scientific Journal*, Vol. 1, pp.18–21.
16. Pavlenko, M.A. (2021), "Method of studying the behavior of groups of mobile objects using cellular automatic machines [Metod vyvchennya povedinky hrup mobil'nykh ob'yektiv za dopomohoyu klitynnykh avtomativ]", *Armament systems and military equipment*, Vol. 3, pp. 92-98.

Received (Надійшла) 10.09.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.11.2021

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Чистов Валерій Ігорович** – ад'юнкт, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;



**Valerii Chystov** – adjunct, Ivan Kozhedub Kharkiv National University of Air Force, Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [valera.chystov43@gmail.com](mailto:valera.chystov43@gmail.com); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4401-3773>.

**Захарченко Ирина Вікторівна** – кандидат технічних наук, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

**Iryna Zakharchenko** – Candidate of Technical Sciences, Ivan Kozhedub Kharkiv National University of Air Force, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [zaharchenko.irina@gmail.com](mailto:zaharchenko.irina@gmail.com); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8534-1888>.

**Павленко Владислава Максимівна** – студентка, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна;

**Vladislava Pavlenko** – student, V. M. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [vladislava.pavlenko@gmail.com](mailto:vladislava.pavlenko@gmail.com); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0976-0252>.

**Павленко Максим Анатолійович** – доктор технічних наук, професор, начальник кафедри математичного та програмного забезпечення АСУ, Харківський національний університет Повітряних Сил, Харків, Україна;

**Maksim Pavlenko** – Doctor of technical sciences, Professor, Chair of mathematical and software ACS department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [bpqma@ukr.net](mailto:bpqma@ukr.net); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3216-1864>.

### **Метод выбора стратегии поведения клеточного автомата при решении задачи поиска группой подвижных объектов**

В. И. Чистов, И. В. Захарченко, В. М. Павленко, М. А. Павленко

**Аннотация.** В настоящее время разработано большое количество различных математических моделей и методов направленных на решение задач многомерной оптимизации и моделирования сложных поведенческих систем. Одним из направлений поиска решений является поиск решений в условиях неполноты информации и необходимости учета изменяющихся внешних факторов. Зачастую такие задачи решаются методом полного перебора. В некоторых условиях метод полного перебора может быть существенно усовершенствован за счет реализации и использования поведенческих моделей природных образований. Примерами таких образований могут быть групповое поведение насекомых, птиц, рыб, различных стай и др. В работе использована идея копирования групповой деятельности косяка рыб при решении задач совместной деятельности по добыче пропитания. Положенные в основу рассуждений о имитации поведения такого природного объекта позволило обосновать выбор в качестве математической модели – клеточные автоматы. В работе исследованы ключевые особенности работы такой модели. Проведено моделирование его работы, разработаны стратегии поведения группы подвижных объектов при поиске целей, исследованы ключевые характеристики и разработан метод адаптивного выбора стратегии и изменения правил поведения с учетом особенностей решаемой задачи. В работе реализована стратегия поиска, которая учитывает необходимость решения оптимизационной задачи по двум параметрам. Полученные результаты свидетельствуют о высокой описательной возможности такого подхода, возможности нахождения оптимальной стратегии поведения клеточного автомата и формализации процесса подбора параметров его работы. Дальнейшим совершенствованием такого подхода может быть проведение имитационного моделирования для исследования свойств разработанной модели, формирования оптимального набора правил работы и параметров автомата для всего множества решаемых задач.

**Ключевые слова:** клеточный автомат; поиск пути; задания оптимизации; случайный поиск; модель.

### **Метод вибору стратегії поведінки клітинного автомата при рішенні завдання пошуку групою рухомих об'єктів**

В. І. Чистов, І. В. Захарченко, В. М. Павленко, М. А. Павленко

**Анотація.** На даний час розроблено велику кількість різних математичних моделей і методів спрямованих на вирішення завдань багатовимірної оптимізації та моделювання складних поведінкових систем. Одним з напрямків пошуку рішень є пошук рішень в умовах неповноти інформації і необхідності обліку змінних зовнішніх факторів. Найчастіше такі завдання вирішуються шляхом повного перебору. У деяких умовах метод повного перебору може бути істотно вдосконалений за рахунок реалізації та використання поведінкових моделей природних утворень. Прикладами таких утворень може бути групове поведінка комах, птахів, риби, різних зграй тощо. У роботі використана ідея копіювання групової діяльності косяка риби при вирішенні завдань спільної діяльності з пошуку харчування. Покладення за основу міркування про імітацію поведінки такого природного об'єкта дозволило обґрунтувати вибір в якості математичної моделі – клітинні автомати. У роботі досліджено ключові особливості роботи такої моделі. Проведено моделювання його роботи, розроблено стратегії поведінки групи рухомих об'єктів при пошуку цілей, досліджено ключові характеристики та розроблено метод адаптивного вибору стратегії та зміни правил поведінки з урахуванням особливостей розв'язуваного завдання. У роботі реалізовано стратегію пошуку, яка враховує необхідність вирішення оптимізаційної задачі за двома параметрами. Отримані результати свідчать про високу описову можливість такого підходу, можливість знаходження оптимальної стратегії поведінки клітинного автомата та формалізації процесу підбору параметрів його роботи. Подальшим удосконаленням такого підходу може бути проведення імітаційного моделювання для дослідження властивостей розробленої моделі, формування оптимального набору правил роботи і параметрів автомата для безлічі розв'язуваних завдань.

**Ключові слова:** клітинний автомат; пошук шляхів; завдання оптимізації; випадковий пошук; модель.

# Information systems research

УДК 681.518.22

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.07>

І. В. Григоренко, С. І. Кондрашов, С. М. Григоренко

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

## РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ СЕРЕДОВИЩА ШТУЧНОЇ ЕКОСИСТЕМИ АПАРАТОМ FUZZY-LOGIC

**Анотація.** В роботі розглянуто вирішення науково-практичної задачі розробки та дослідження системи контролю параметрів середовища штучної екосистеми, створення структурної та принципової електричної схеми системи, складання алгоритму її роботи. Дослідження полягає у статистичній обробці результатів прямих багаторазових вимірювань рівню розчинного кисню, рН, температури у акваріумі штучної екосистеми, аналізі похибок та сумарної стандартної невизначеності результатів вимірювань, побудові системи з нечіткою логікою для визначення впливу параметрів водного середовища на якість води у акваріумі. Система дає можливість вимірювати освітленість до 45000 Лк, температуру повітря у діапазоні від 12 до 42 0С, температуру води у діапазоні від 15 до 28 0С, рівень рН від 5 до 9, рівень розчиненого кисню від 5 до 10 мг/л, має датчик наближення, має змогу вмикати, при необхідності, обігрівача, аерацію води, додаткові джерела світла. Похибка вимірювань по кожному з каналів не перевищує 2,5 %. Необхідність створення системи контролю виникла у зв'язку з тим, що є потреба забезпечення природного розвитку рослин та риб в умовах штучної екосистеми, яка імітує середовище максимально схоже із природним. Для того, щоб екосистема виконувала свої функції потрібен своєчасний контроль вказаних параметрів та швидка реакція на вихід параметрів за критичні значення. Ця задача може бути виконана тільки завдяки створенню системи контролю.

**Ключові слова:** екосистема; вимірювання; похибка; невизначеність; нечітка логіка.

### Вступ

Для того щоб наблизити людей до живої природи екзотичних країн Світу, можна створювати куточки живої природи у школі, на підприємстві, установі. Штучна екосистема, що є наочним і різнобічним прикладом тваринного й рослинного миру, допоможе учням у формуванні нової культури взаємин із природою, навколишнім середовищем, а робітникам дають змогу морально відпочити спостерігаючи за живою природою. Такий відпочинок плідна впливає на відновлення працездатності людей.

Штучна екосистема допомагає прилучити дітей з талантом до науково-дослідної роботи, до проектування проектів, виконанню робіт пов'язаних із творчістю. Доглядаючи за рослинами, учні пізнають не тільки їхньої особливості будови, але й вчать правильно доглядати за ними. Для допомоги школярам у підтримці куточку живої природи у гарному стані потрібна автоматизована система контролю основних параметрів мікроклімату.

Впровадження такої системи дозволить підтримувати життєдіяльність рослин та риб, забезпечувати комфортні умови їх проживання, а також можливість своєчасно реагувати на виходи параметрів, що контролюються за межі критичних діапазонів.

З метою визначення впливу параметрів водного середовища на якість води в акваріумі штучної екосистеми запропоновано побудувати евристичний аналізатор за допомогою інтерфейсу користувача системи fuzzy-logic, який є додатком програми MatLab.

Для визначення класу точності вимірювальних каналів штучної екосистеми поставлена задача статистичної обробки результатів прямих багаторазових вимірювань по трьом каналам: рівня розчинного

кисню, рівня рН та температури води. Проводиться оцінювання сумарної стандартної невизначеності результатів вимірювань.

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** У роботі [1] проведено розробку системи контролю параметрів середовища у акваріумі, що призначена для контролю рівня рН, вмісту розчиненого кисню у воді, а також температури води в акваріумі, розроблено структурну схему системи контролю параметрів середовища в акваріумі на базі Arduino nano 3.0. Однак, штучна екосистема складається не тільки з акваріума, але й з ділянки суші, на якій ростуть рослини. Залишається не вирішеним питання контролю та стеження за мікрокліматом усєї екосистеми. Визначення оптимальних параметрів середовища для життєдіяльності риб та рослин також є не вирішеним та актуальним завданням. У роботі [2] запропоновано структурну схему системи контролю параметрів середовища у шкільному живому куточку на базі Arduino nano 3.0.

Використання нечіткої логіки для аналізу та дослідження технологічних процесів розглянуто у роботах провідних світових вчених [3 – 5]. У роботах [6, 7] запропоновано використання нечіткої логіки для контролю якості товарів та послуг. Використаємо також систему fuzzy-logic для визначення впливу параметрів водного середовища на якість води у акваріумі, що є частиною штучної екосистеми.

### Основний матеріал

На рис. 1 представлено варіант побудови структурної схеми системи контролю параметрів мікроклімату штучної екосистеми.

Системи контролю параметрів контролю параметрів середовища штучної екосистеми на базі Arduino nano 3.0 [8] має три канали вимірювання

параметрів середовища у акваріумі. Перший канал вимірює рівень рН води. Другий канал вимірює температуру води. Третій канал – рівень розчиненого кисню. Для вимірювання параметрів повітряного середовища використовуються наступні канали: канал вимірювання рівню освітленості, канал вимірювання температури повітря та канал визначення наближення до екосистеми спостерігачів.

До складу структурної схеми входять такі блоки: ПВП1 – датчик вимірювання рівня рН, ПВП2 – датчик вимірювання температури, ПВП3 – датчик вимірювання розчиненого кисню у воді, ПВП4 – ПВП6 датчики вимірювання рівня освітленості, температури повітря, наближення до екосистеми. ЦВП – цифровий відліковий пристрій використовується для представлення інформації оператору. Arduino nano 3.0. працює завдяки інтегрованому програмному середовищу (IDE), що дає змогу писати, компілювати програми, а також дає змогу завантажувати їх в апаратуру.

Система життєзабезпечення складається із нагрівача і аератора води, а також системи освітлення приміщення. Блок реле призначений для вмикання / вимикання нагрівача та аератора води і системи освітлення приміщення. Блок живлення – допоміжний пристрій, що забезпечує живлення усіх компонентів вимірювача. Arduino nano 3.0. здатний передавати данні по параметрам, що контролюються до персональної електронно-обчислювальної машини по USB Mini – B [2, 8].

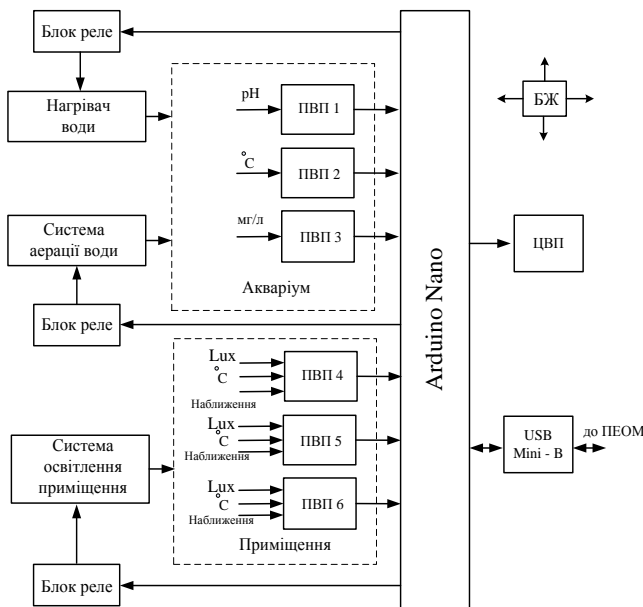


Рис. 1. Структурна схема системи контролю

Принципова електрична схема системи контролю параметрів середовища штучної екосистеми наведена на рис. 2.

Датчики контролю параметрів середовища у приміщенні, а саме – рівня освітленості приміщення, температури повітря, наближення представлені мікросхемами DD1 – DD3 (MAX44005EDT). Датчики рівню рН CPS31D, рівню розчиненого кисню COS41, температури у акваріумі ТЕМП-01 підключаються до роз’єднувача X2, X3, X4 відповідно. Живлення до

схеми надходить через роз’єднувач X5. Вихідні сигнали у вигляді напруги з датчика рівню розчиненого кисню у аналоговій формі надходить на шину Arduino Nano 3.0 (DD4). DD4 має у своєму складі мікроконтролер АТmega328 з убудованим 8-канальним 10-розрядним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП).

Сигнали з датчиків рівню рН, температури води ТЕМП-01 та датчиків DD1 – DD3 надходять до Arduino Nano 3.0 (DD4) у вигляді коду.

Arduino Nano 3.0 (DD3) здійснює обробку результату вимірювання і передає готовий результат вимірювання на ЦВП HD44780 (HG1).

Транзистори VT1, VT2 та VT3 необхідні для управління роботою реле SSR-25DA.

Для того, щоб визначити сумарну стандартну невизначеність результатів вимірювань параметрів водного середовища штучної екосистеми було проведено обробку результатів прямих багаторазових вимірювань з датчиків контролю рівня розчинного кисню, рівня рН води та температури. Для перевірки гіпотези про закон розподілу результатів вимірювань було використано складений критерій. Результати спостережень уважаються незалежними й рівноточними (за умовами експерименту). У загальному випадку вони можуть містити систематичні й випадкову складові похибки вимірів. Зазначимо довірчу ймовірність  $P = 0,95$  (або рівень значимості  $\alpha = 0,05$ ) результатів вимірів.

На рис. 3- 5 представлено результати спостережень за зміною рівня розчинного кисню, рівня рН води та температури відповідно. У всіх трьох випадках підтверджено гіпотезу про нормальність закону розподілу результатів вимірювань.

Оскільки за умовами експерименту довірча ймовірність  $P = 0,95$ , то використаємо для визначення границі довірчого інтервалу формулу

$$\Delta_d = \pm 2\hat{\sigma}_\Delta, \tag{1}$$

де  $\hat{\sigma}_\Delta$  – незміщена оцінка середньоквадратичного відхилення результатів спостережень.

У такому випадку проведемо розрахунки границі довірчого інтервалу випадкових похибок, що отримані при вимірювання рівню розчинного кисню, рН та температури у акваріумі штучної екосистеми.

Виконаємо розрахунок відносної похибки вимірювання по кожному з каналів за формулою

$$\delta_X = \pm \frac{\Delta_X}{\bar{X}} \cdot 100\%; \tag{2}$$

$$\delta_O = \pm \frac{\Delta_O}{\bar{O}} \cdot 100\% = \pm \frac{0,15}{8,13} \cdot 100\% = 1,8\%;$$

$$\delta_{pH} = \pm \frac{\Delta_{pH}}{\bar{pH}} \cdot 100\% = \pm \frac{0,19}{7,42} \cdot 100\% = 2,5\% .;$$

$$\delta_t = \pm \frac{\Delta_t}{\bar{t}} \cdot 100\% = \pm \frac{0,4}{24,8} \cdot 100\% = 1,6\% .$$

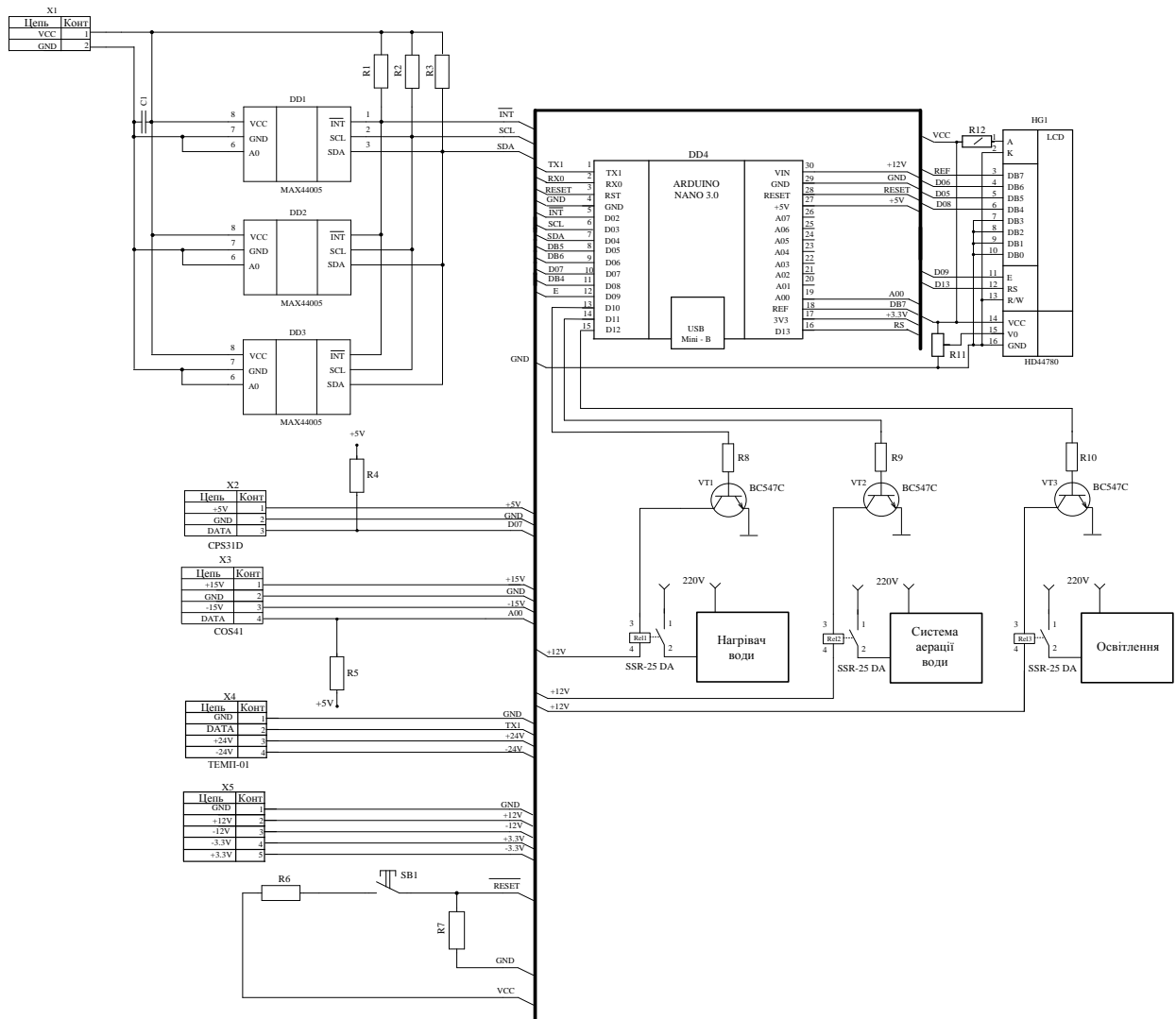


Рис. 2. Схема електрична принципова системи контролю

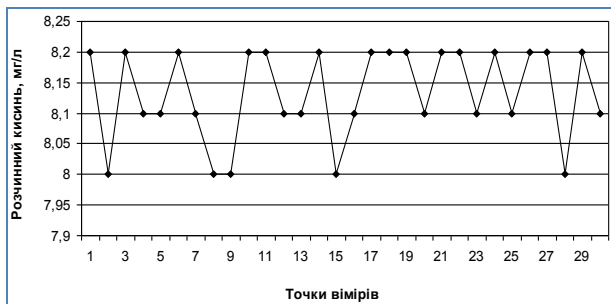


Рис. 3. Результати спостережень за зміною рівня розчинного кисню

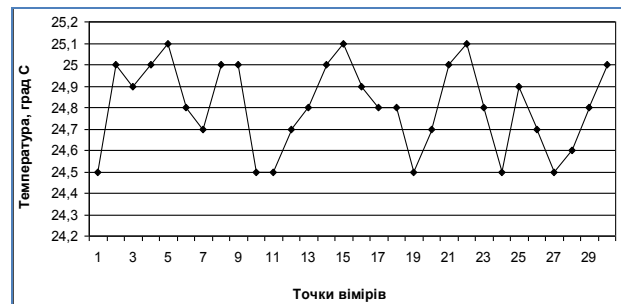


Рис. 5. Результати спостережень за зміною температури

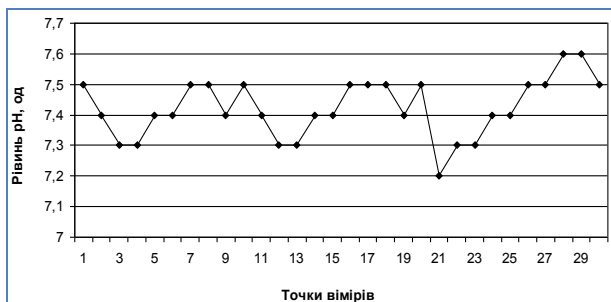


Рис. 4. Результати спостережень за зміною рівня pH води

Згідно з (1) напишемо формули для визначення границі довірчого інтервалу випадкових похибок

$$\Delta O = \pm 2\hat{\sigma}_O = \pm 2 \cdot 0,076 = \pm 0,15 \text{ мг/л};$$

$$\Delta pH = \pm 2\hat{\sigma}_{pH} = \pm 2 \cdot 0,096 = \pm 0,19 \text{ од. pH};$$

$$\Delta t = \pm 2\hat{\sigma}_t = \pm 2 \cdot 0,2 = \pm 0,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Таким чином, жодна з відносних похибок по каналам вимірювання не перевищує встановлену у технічному завданні 2,5%.

Стандартна невизначеність вимірювань типу А вхідної величини  $x_i$  розраховується за формулою [9, 10]:

$$u_A(\bar{x}_i) = \sqrt{\sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - \bar{x}_i)^2 / (n_i (n_i - 1))}, \quad (3)$$

де  $n_i$  – кількість спостережень проведених при вимірюванні  $x_i$ .

Стандартна невизначеність вимірювань типу А вхідних величин – рівень розчинного кисню, рівень рН води, температура води за формулою (3)

$$u_A(\bar{O}_i) = 0,014 \text{ мг/л.}$$

$$u_A(p\bar{H}_i) = 0,018 \text{ од рН.}$$

$$u_A(\bar{t}_i) = 0,037 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Стандартна невизначеність типу В при нормальному законі розподілу оцінюється за формулою [9, 10]:

$$u_B(x) = \frac{b-a}{6}, \quad (4)$$

де  $a$  і  $b$  – ліва та права межі розподілу відповідно.

Стандартна невизначеність вимірювань типу В вхідних величин – рівень розчинного кисню, рівень рН води, температура води за формулою (4)

$$u_B(O) = 0,025 \text{ мг/л.}$$

$$u_B(pH) = 0,032 \text{ од рН.}$$

$$u_B(t) = 0,067 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Сумарна стандартна невизначеність вихідної величини у матиме такий вигляд [9,10]

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)}. \quad (5)$$

Виконаємо розрахунок по кожному з вимірювальних каналів:

$$u_c(O) = \sqrt{(u_A(\bar{O}_i))^2 + (u_B(O))^2} = 0,28 \text{ мг/л;}$$

$$u_c(pH) = \sqrt{(u_A(p\bar{H}_i))^2 + (u_B(pH))^2} = 0,039 \text{ од рН;}$$

$$u_c(t) = \sqrt{(u_A(\bar{t}_i))^2 + (u_B(t))^2} = 0,08 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Для побудови евристичного аналізатора використаємо інтерфейс системи fuzzy-logic, що є додатком програми MatLab. У моделі створюємо три входи і один вихід. У якості першого входу обираємо показник – рівень розчинного кисню. У якості другого входу – рівень рН води. Третій вхід це температура води у акваріу-

мі. У якості вихідної величини обираємо якість води у акваріумі (максимально придатна для риб та рослин) (рис. 6).

Задаємо функції належності для обраної вхідних змінних. Для рівня розчинного кисню встановимо діапазон у якому змінюється функція (від 5 до 10 мг/л). Задаємо тип функції належності та визначений розподіл Гауса для трьох вхідних величин. Для рівень рН води встановимо діапазон від 5 до 9 од. рН. Для температура води встановимо діапазон від 15 до 25  $^\circ\text{C}$ . Задаємо функцію належності для обраної вихідної змінної – якість води. Діапазон у якому змінюється функція «Якість» встановлюємо від 1 до 10 відносних одиниць. Для змінної «Якість» обираємо трикутний закон розподілу. Задаємо правила, за якими буде діяти модель.

Якість характеризується такими параметрами як рівень розчинного кисню, рівень рН та температура води. У вікні «правила» складемо правила, які характеризують якість.

Наприклад, якщо рівень розчинного кисню «min», рівень рН «min», та температура «min», то якість води «погана».

Поверхні відгуку при трьох можливих сполученнях параметрів, що впливають на якість води зображені на рис. 7.

При виборі методу або комплексу методів НК конкретних деталей або вузлів необхідно враховувати наступні основні чинники: характер (вид) дефекту і його розташування, чутливість методу контролю, умови роботи деталей і ТУ на виріб, матеріал деталі, стан і шорсткість поверхні, форму і розмір деталі, стан і шорсткість поверхні, форму і розмір деталі, зони контролю, доступність деталі і зони контролю, умови контролю [1 –3].

### Висновки

1. У роботі представлено структурну та електричну принципову схеми системи контролю параметрів середовища штучної екосистеми.

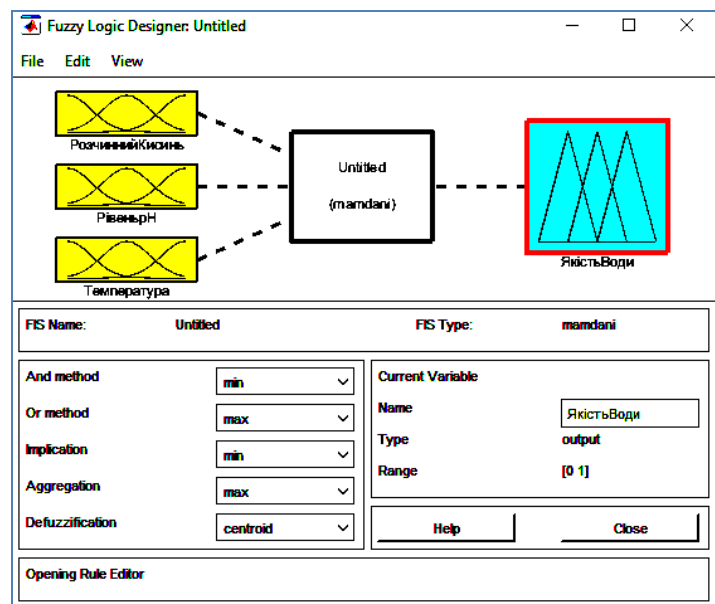


Рис. 6. Визначення вхідних та вихідних параметрів

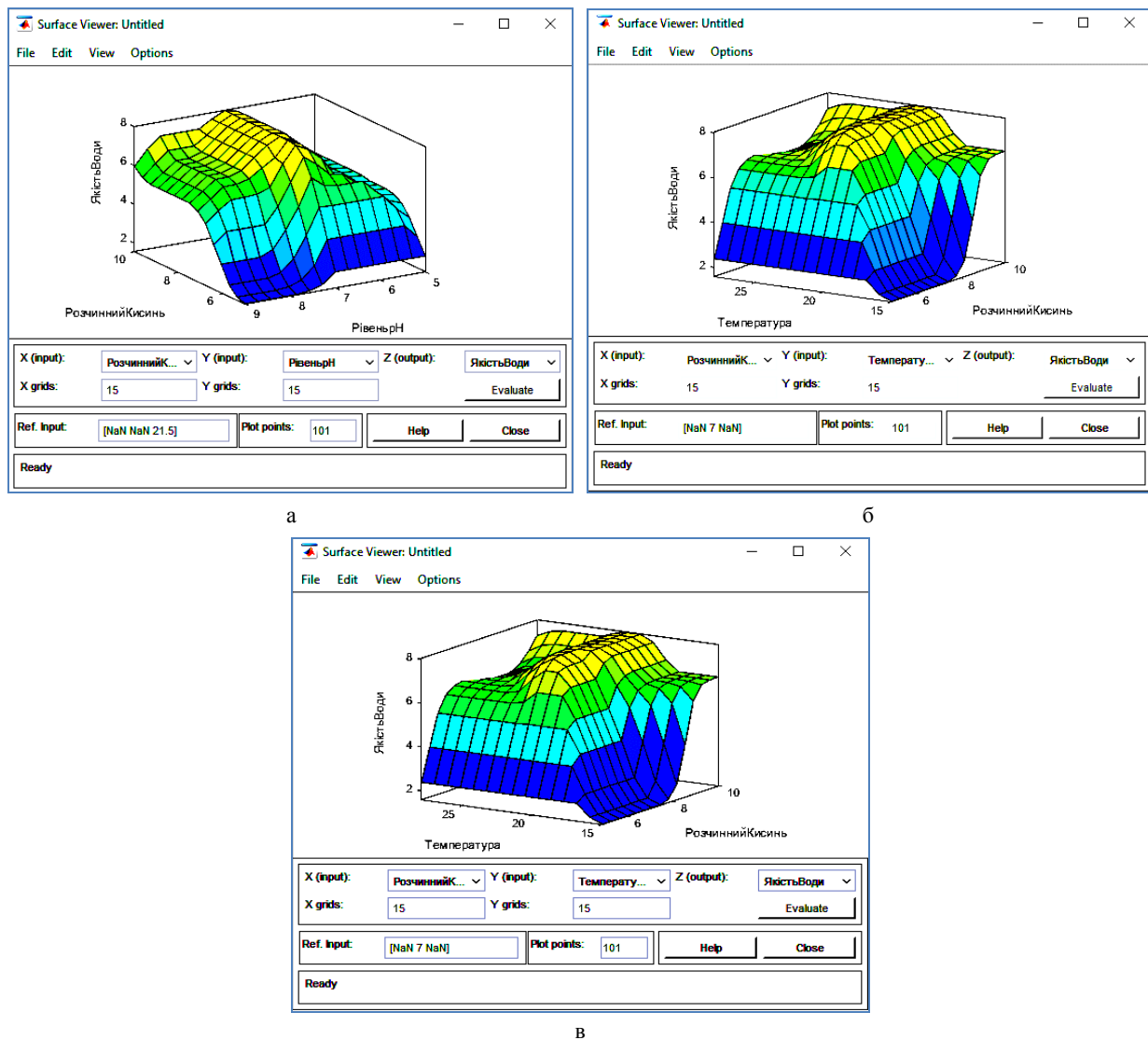


Рис. 7. Поверхні відгуку при трьох можливих сполученнях параметрів

2. На підставі даних, отриманих із результатів натурних вимірювань параметрів водного середовища штучної екосистеми вдалося провести розрахунки стандартних невизначеностей по типам А та В, та сумарної стандартної невизначеності. Отримані значення невизначеності задовольняють умовам технічного завдання.

3. Побудовано систему з нечіткою логікою, яка надала можливість встановити який саме вплив на

якість води штучної екосистеми оказують рівень розчинного кисню, рівень рН та температура. Встановлено, що підтримка параметрів технологічного процесу у середині робочого діапазону дає можливість отримати найвищу якість води штучної екосистеми.

Оптимальна якість води буде коли рівень розчинного кисню дорівнює 8,13 мг/л, рівень рН – 7,42 %, температура – 24,8 °С.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ (REFERENCES)

1. Григоренко І. В. Розробка системи контролю параметрів середовища в акваріумі [Development of a system for monitoring the parameters of the environment in the aquarium]. *Метрологія та прилади* [Metrologiya ta priladi]. Харків, 2019. №1 (75). С. 66-71.
2. Григоренко І. В. Системи контролю параметрів середовища у шкільному живому куточку [Control systems of environment parameters in school living space]. *XXVIII Міжнар. наук. – практ. конф.: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*. Том 2. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. С. 12.
3. Zadeh L. A. Fuzzy logic – computing with words. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 1996. Vol. 4, Issue 2. P. 103-111.
4. Larsen H.L., Yager R.R. A framework for fuzzy recognition technology. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. Part C (Applications and Reviews). 2000. Vol. 30, Issue 1. P. 65-76.
5. Sankar Ganesh S., Bhargav Reddy N., Arulmozhivarman P. Forecasting air quality index based on Mamdani fuzzy inference system. *2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI)*, 11–12 May 2017, Tirunelveli, India.
6. Ціделко В. Інформаційні технології на базі нечіткої логіки (FUZZY LOGIC) [Information technologies based on fuzzy logic (FUZZY LOGIC)]. *Вимрювальна техніка та метрологія*: 36. наук. праць НУ «Львівська політехніка». Львів, 2001. № 58. С. 3–15.

7. Hrihorenko I. Application of user interface Fuzzy Logic Toolbox for quality control of products and services. *Сучасні інформаційні системи [Advanced information system]*. Vol. 3, No. 4. P. 118–125. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.4.18>
8. Arduino Nano 3.0. URL: <https://store.arduino.cc/arduino-nano>.
9. ДСТУ ISO/TS 21749:2013 (ISO/TS 21749:2005, IDT) Національний стандарт України. Невизначеність вимірювання в метрологічній практиці. Повторні вимірювання та ієрархічні експерименти. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=62233](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=62233)
10. Захаров И. П. Неопределённость измерений для чайников и начальников [Measurement uncertainty for dummies and bosses]: учеб. Пособие. Харьков, 2015. 52 с.

Received (Надійшла) 27.08.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.10.2021

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

- Григоренко Ігор Володимирович** – кандидат технічних наук, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;  
**Ihor Hryhorenko** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Department of Information and Measuring Technologies and Systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;  
 e-mail: [grigmaestro@gmail.com](mailto:grigmaestro@gmail.com); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4905-3053>.
- Кондрашов Сергій Іванович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;  
**Serhii Kondrashov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Information and Measuring Technologies and Systems National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» Kharkiv, Ukraine;  
 e-mail: [Serhii.Kondrashov@khp.edu.ua](mailto:Serhii.Kondrashov@khp.edu.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5191-8562>
- Григоренко Світлана Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю і діагностики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна;  
**Svitlana Hryhorenko** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Department of Computer and Radio-Electronic Control Systems and Diagnostics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;  
 e-mail: [sngloba@gmail.com](mailto:sngloba@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5375-9534>.

**Разработка и исследование системы контроля параметров среды искусственной экосистемы аппаратом fuzzy-logic**

И. В. Григоренко, С. И. Кондрашов, С. Н. Григоренко

**Аннотация.** В работе рассмотрено решение научно-практической задачи разработки и исследования системы контроля параметров среды искусственной экосистемы, создание структурной и принципиальной электрической схемы системы, составление алгоритма ее работы. Исследования заключается в статистической обработке результатов прямых многократных измерений уровня растворенного кислорода, pH, температуры в аквариуме искусственной экосистемы, анализе погрешностей и суммарной стандартной неопределенности результатов измерений, построении системы с нечеткой логикой для определения влияния параметров водной среды на качество воды в аквариуме. Система даёт возможность измерять освещенность до 45000 Лк, температуру воздуха в диапазоне от 12 до 42 0С, температуру воды в диапазоне от 15 до 28 0С, уровень pH от 5 до 9, уровень растворенного кислорода от 5 до 10 мг / л, имеет датчик приближения и возможность включать, при необходимости, обогрев, аэрацию воды, дополнительные источники света. Погрешность измерений по каждому из каналов не превышает 2,5%.

**Ключевые слова:** экосистема, измерения, погрешность, неопределённость, контроль, нечёткая логика.

**Development and research of the parameters control system of the artificial ecosystem environment by the fuzzy-logic system**

Ihor Hryhorenko, Serhii Kondrashov, Svitlana Hryhorenko

**Abstract.** The paper considers the solution of scientific and practical problem of development and research of control system of parameters of environment of artificial ecosystem, creation of structural and basic electric scheme of system, drawing up of algorithm of its work. The study consists of statistical processing of the results of direct repeated measurements of soluble oxygen level, pH, temperature in the aquarium of the artificial ecosystem, analysis of errors and total standard uncertainty of measurement results, construction of a system with fuzzy logic to determine the impact of aquatic parameters on aquarium water quality. The system makes it possible to measure illuminance up to 45,000 lux, air temperature in the range from 12 to 42 0C, water temperature in the range from 15 to 28 0C, pH level from 5 to 9, dissolved oxygen level from 5 to 10 mg / l, has a proximity sensor, has the ability to turn on, if necessary, heating, water aeration, additional light sources. The measurement error on each of the channels does not exceed 2.5%. The need to create a control system arose due to the fact that there is a need to ensure the natural development of plants and fish in an artificial ecosystem that mimics the environment as close as possible to the natural one. In order for the ecosystem to perform its functions, it is necessary to timely control these parameters and respond quickly to the parameters exceeding the critical values. This task can be accomplished only by creating a control system. In order to bring people closer to the wildlife of exotic countries of the world, you can create corners of wildlife at school, enterprise, institution. An artificial ecosystem, which is a clear and versatile example of wildlife, will help students in the formation of a new culture of relationships with nature, the environment, and allow workers to relax morally by observing wildlife. Such a fruitful rest affects the recovery of people. The artificial ecosystem helps to involve children with talent in research work, in designing projects, performing works related to creativity.

**Keywords:** ecosystem, measurements, error, uncertainty, fuzzy logic.

Svitlana Krepych, Iryna Spivak

West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

## IMPROVEMENT OF SVD ALGORITHM TO INCREASE THE EFFICIENCY OF RECOMMENDATION SYSTEMS

**Abstract.** Many existing websites use recommendation systems for their users. They generate various offers for them, for example, similar products or recommend the people registered on this site with similar interests. Such referral mechanisms process vast amounts of information to identify potential user preferences. Recommendation systems are programs that try to determine what users want to find, what might interest them, and recommend it to them. These mechanisms have improved the interaction between the user and the site. Instead of static information, they provide dynamic information that changes: recommendations are generated separately for each user, based on his previous activity on this web resource. Information from other visitors may also be taken into account. The methods of collecting information provided by the Internet have greatly simplified the use of human thought through collaborative filtering. But, on the other hand, the large amount of information complicates the implementation of this possibility. For example, the behavior of some people is quite clearly amenable to modeling, while others behave completely unpredictably. And it is the latter that affect the shift of the results of the recommendation system and reduce its effectiveness. An analysis of Internet resources has shown that most of the recommendation systems do not provide recommendations to users, and the part that does, for example, offers products to the user, selects recommendations manually. Therefore, the task of developing methods for automated generation of recommendations for a limited set of input data is quite relevant. The problems of data sparseness, new user problem, scalability of the widely used SVD algorithm for the development of such recommendation systems are proposed to be eliminated by improving this algorithm by the method of the nearest k-neighbors. This method will allow you to easily segment and cluster system data, which will save system resources.

**Keywords:** recommendation system; SVD algorithm; k-nearest neighbors' method; data sparseness; scalability; clustering.

### Introduction

The problem of choice has always existed. Today is no exception. However, nowadays this problem is especially acute, because in many cases the wrong choice leads to a loss of profit. To solve this problem, recommendation systems have been created [1]. By analyzing the similarities of users and their ratings, the recommendation system can offer similar objects (books, music, videos, etc.).

However, recommendation systems have a number of disadvantages, in particular:

- sparse data - recommendation systems operate with a huge amount of data, and most users do not participate in the evaluation of objects and, accordingly, do not evaluate them;

- the problem of a new user - with the advent of new users or objects of evaluation there is a problem of similarity due to lack of information. Yes, new users can't get feedback until they rate certain items themselves;

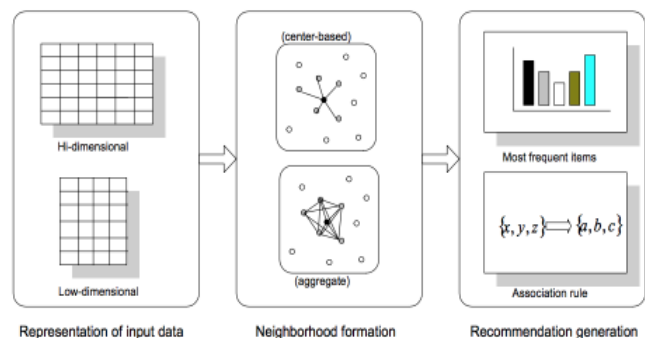
- scalability - the next problem is related to the growing number of users in the system.

There are algorithms that lack some of the above disadvantages, but the quality of the recommendations of such algorithms is quite low. To address these and other shortcomings of recommendation systems, it is proposed to use the SVD algorithm. It is simple, incredibly flexible and, importantly, shows good quality recommendations.

### Statement of task

The general principle of operation of recommendation systems is presented in Fig. 1. Methods of collecting information by recommendation systems

are divided into two types: explicit data collection and implicit. When explicitly collecting data, the user provides all the necessary information for further processing. This can include both standard personal data and evaluative judgments of content from various fields. If a visitor refuses to provide information about himself, the following method becomes relevant - implicit data collection. There is a kind of tracking of a person, during which the user's actions are recorded by a special program that constantly collects the necessary information for further analysis and application [2].



**Fig. 1.** The principle of operation of recommendation systems

To solve the problem with a new user and a high sparse matrix, it is recommended to use a regulator. Regularization solves the problem of retraining. That is, when the new model works well with test sample data, but behaves unexpectedly with data samples that did not participate in the training.

To solve the problem of scalability, it is proposed to use the method of nearest k-neighbors. This method allows us to easily segment and cluster system data. This saves resources, because the system will use only the data



of those users who are with it in the same cluster. An analysis of Internet resources revealed that most of them don't provide recommendations to users. The part of the resources that make this, for example, offers the user products, goods, etc., selects recommendations manually, the process is not automated [3]. Therefore, the task of developing methods and software to create recommendations interesting materials for user based on a limited set of input data is actual.

### Research result

Suppose we have a matrix  $R$ , that consists of ratings  $r$  (in our case, the number of ratings) that users  $i$  have assigned to products  $a$ . It turns out a matrix  $R = (r_{ia})^{N \times M}$ , in which the ratings known to us are written down. As a rule, one user will not be able to appreciate a significant proportion of products. Therefore, it is unlikely that there will be many products that are ready to appreciate by a significant part of users [4]. This means that the matrix  $R$  is very sparse. We apply to it the so-called singular decomposition in the form:

$$R = UDV^T, \quad (1)$$

where the matrix  $U$  and  $V$  – orthogonal, and  $D$  – diagonal.  $R$  – large size matrix  $N \times M$ , but of small rank  $f$ , that is, it can be decomposed into the product of the matrix  $N \times f$  and matrix  $f \times M$ , thereby drastically reducing the number of parameters from  $N \times M$  to  $(N + M) \times f$ . The main property of the SVD method is that it gives the optimal approximation if in the matrix  $D$  just leave the straight  $f$  the first diagonal elements, and the rest to put equal 0, that is

$$R = UDV^T = U \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_k \end{pmatrix} V^T \approx U \begin{bmatrix} \sigma_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \sigma_f \end{bmatrix} V^T. \quad (2)$$

In the diagonal matrix  $D$  elements are sorted by the size:  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_k$ , to zeroed the last elements, it means to zeroed the smallest elements. And  $f$  is selected based on the size of the singular values of the matrix, the same diagonal elements of the matrix  $D$ . It is desirable to discard as many elements as possible. In the case of recommendation systems, it turns out that we represent each user with the vector of  $f$  factors  $U_i$ , and each product is a vector with  $f$  factors  $V_j$ . Next, to predict the users  $i$  rating of the product  $j$ , we take their scalar product. We have a task: according to the known evaluations of known products to predict how well each product will be appreciated by the new user.

Introduce the so-called basic predictors  $b_{i,a}$ , which consist of basic predictors of individual users  $b_i$  and individual products  $b_a$ , as well as just the overall component of the average rating on the base  $\mu$ :

$$b_{i,a} = \mu + b_i + b_a, \quad (3)$$

where  $\mu$  – of the average rating on the base;  $b_i$  – basic predictors of individual users;  $b_a$  the average rating of each product  $a$ .

To determine only the basic predictors, you need to find the following  $\mu$ ,  $b_i$  and  $b_a$ , for which  $b_{i,a}$  the best approximate the available ratings. After obtaining the basic predictors, the residues will be comparable with each other and based on them obtained reasonable values for the factors:

$$\hat{r}_{ia} = \mu + b_i + b_a + v_a^T u_i, \quad (4)$$

where  $v_a$  – vector of factors representing the product  $a$ ;  $u_i$  – vector of factors representing the user  $i$ .

Now we can return to the original problem and formulate it precisely: we need to find predictors that minimize the next function:

$$L(\mu, b_i, b_a, v_a, u_i) = \sum_{(i,a) \in D} (r_{ia} - \hat{r}_{ia})^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

Function  $L(\mu, b_i, b_a, v_a, u_i)$  can be minimized based on the gradient descent method [5]. However, over time it will be very costly, because we do not know the location of the vectors we need, and we still need to minimize the error.

In order to reduce the runtime of the SVD algorithm and minimize the magnitude of the error, we use the k-nearest neighbor (kNN) algorithm for large amounts of data. This will allow us to use it with a very sparse matrix and with large amounts of data, as well as save resources, because the system will use the data only of those users who are with the current user in the same group. We briefly describe the essence of this method.

Method kNN – is one of the simplest methods of classification. Due to its simplicity and scalability, it is extremely effective for classification. The task of classification in machine learning means the task of assigning an object to one of the predefined classes on the basis of its formalized features. Each of the objects in this problem is represented as a vector in  $N$ -measuring space, each dimension of which is a description of one of the features of the object [6].

To classify each of the objects of the test sample, we must perform the following operations:

- calculate the distance to each of the objects of the training sample;
- select  $k$  objects of the training sample, the distance to which is minimal;
- the class of the object to be classified, – s the class that most often occurs among  $k$  the nearest neighbors.

So there is a set of objects for each of which a class is specified.

Now we need to divide this set into two parts: the training sample and the test sample. This breakdown describes the code shown in Listing 1.

Not only the Euclidean distance can be used to determine the distance between objects. Manhattan distance, cosine measure, Pearson's correlation criterion and others are also widely used.

```
def splitTrainTest (data, testPercentage):
    trainDataArray = []
    testDataArray = []
    for row in data:
        if random.random() < testPercentage:
            testDataArray.append(row)
        else:
            trainDataArray.append(row)
    return trainDataArray, testDataArray
```

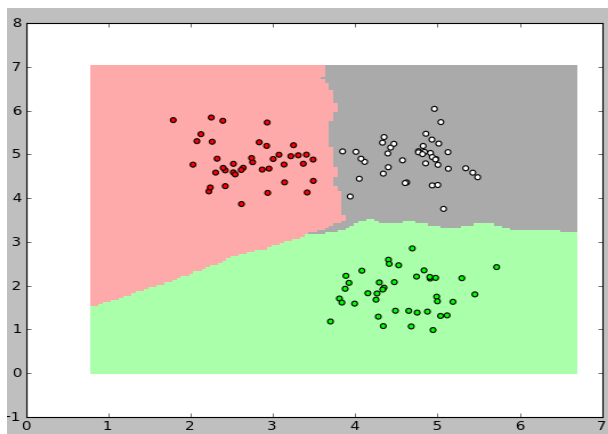
**Listing 1**

Now, having a training sample, you can implement the classification algorithm (Listing 2).

```
def classifyKNN (trainDataArray, testDataArray,
k, amountOfClasses):
    def dist (a, b):
        return math.sqrt((a[0] - b[0])**2 +
(a[1] - b[1])**2)
    testLabels = []
    for testPoint in testDataArray:
        testDistance = [ dist(testPoint,
trainDataArray[i][0]), trainDataArray[i][1]] for i
in range(len(trainDataArray))]
        stat = [0 for i in
range(amountOfClasses)]
        for d in sorted(testDistance)[0:k]:
            stat[d[1]] += 1
        testLabels.append( sorted(zip(stat,
range(amountOfClasses)), reverse=True)[0][1] )
    return testLabels
```

**Listing 2**

In the Fig. 2 an example of the operation of the classification algorithm for 40 elements when  $k = 3$ .



**Fig. 2.** The work of the kNN classifier algorithm

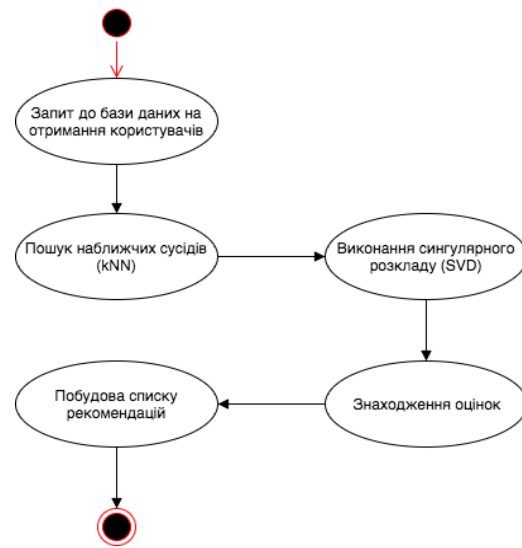
For the correct operation of the method with the new data, the class was modified to the form in Listing 3. Schematically, the operation of the advanced method is represented by a UML state diagram in the Fig. 3. The verification of the effectiveness of the application of the improved method to increase the efficiency of the recommendation systems was carried out on the basis of the calculation of the average absolute error:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_{ia} - \hat{r}_{ia}|, \quad (6)$$

where  $n$  – number of users.

```
class NearestNeighborsStrategy():
    def _set_similarity(self, data_model,
similarity, dist, neirhood_size):
        if not isinstance(self.similarity,
UserSimilarity) \
            or not distance ==
self.similarity.distance:
            neirhood_count = neirhood_count if not
neirhood_count else neirhood_count + 1
            self.similarity =
UserSimilarity(data_model, distance,
neirhood_count)
        def user_neighborhood(self, user, data_model,
similarity='user_similarity', dist=None,
neirhood_count=False, **params):
            minimal_similarity =
params.get('minimal_similarity', 0.0)
            sampling_rate = params.get('sampling_rate',
1.0)
            data_model = self._sampling(data_model,
sampling_rate)
            if dist is None:
                dist = euclidean_distances_method
            if similarity == 'user_similarity':
                self._set_similarity(data_model,
similarity, dist)
            else:
                raise ValueError('wrong similarity
method')
            neighborhood = [tmp_user_id for tmp_user_id,
score in self.similarity[user]
            if not np.isnan(score) and score >=
minimal_similarity and user != tmp_user_id]
            return neighborhood
```

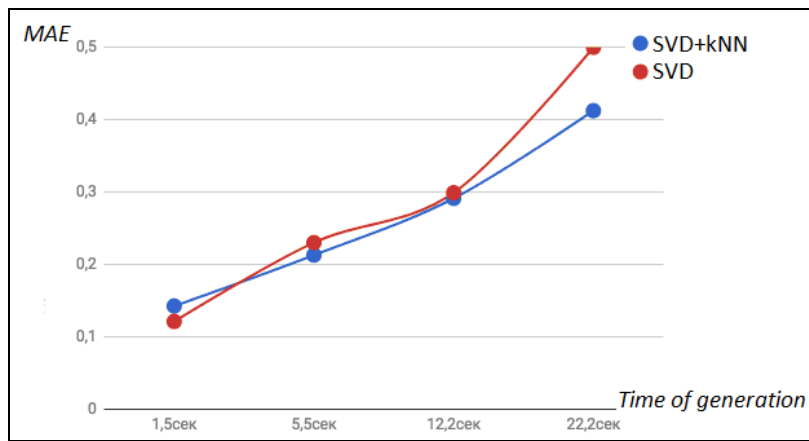
**Listing 3**



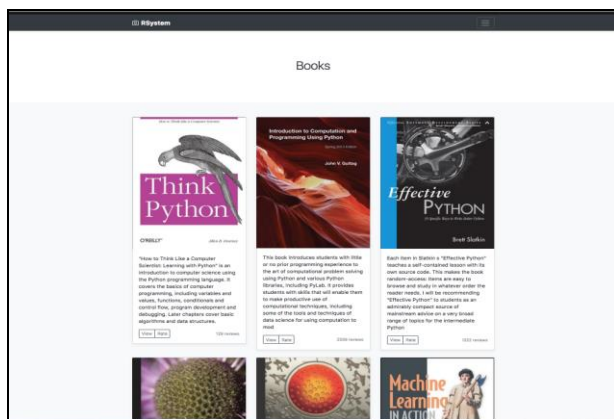
**Fig. 3.** Schematic work of the advanced method

Fig. 4 shows a comparison of the usual recommendation method and its improvement based on the kNN method.

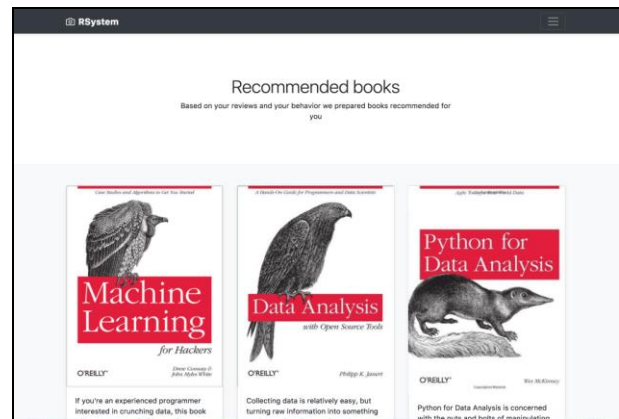
The software system of book recommendations for users was developed based on the improved method [7]. The principle of operation of the system is as follows: after the user has successfully logged in, a list of books available in the system is available to him (Fig. 5). Then the user can give their ratings to books, add new ones if the book is not available on the site. Through ratings, reviews and reviews, the system can predict the ratings that the user could give to other books (Fig. 6).



**Fig. 4.** The dependence of the increase in errors in the system relative to the time of generation of user query results



**Fig. 5.** Display page of all books



**Fig. 6.** Book recommendations page

Fig. 7 shows the result of the implementation of the recommendation module.

```

→ ~ python recommendation.py
User ID: 12
Similar users: [1, 4, 5, 6, 7, 12, 44]
User books IDs: [5, 6, 9]
Recommendations: [(8, 3.3477895267131013), (1, 2.8572508984333034), (4, 2.4473604699719846)]
→ ~
    
```

**Fig. 7.** The result of the recommendation module

The image shows that the system recommends the user to view books with ID 8, 1 and 4 with their recommendation ratios.

**Conclusions**

The problem of increase of efficiency of work of recommendation systems is considered in the work. It is shown that the most used algorithm for providing recommendations in such systems is the SVD algorithm. However, this algorithm has a number of disadvantages,

including sparse data, the problem of a new user and the problem of scalability. To solve these problems, it was proposed to improve the SVD algorithm by using the method of nearest neighbors, which saves a lot of time and computing resources, because the system to provide recommendations uses data only from users who are in the same cluster. The quality of both methods was tested on the example of book recommendations to the user and a comparative graph of the error of their application.

**REFERENCES**

1. Roisner, M. (2020), *How recommender systems work*, available at: <https://habrahabr.ru/company/yandex/blog/241455/>
2. Goncharov, M. (2020), *Data Mining: Recommender Systems*, available at: [http://kek.ksu.ru/EOS/WM/50\\_132-670.pdf](http://kek.ksu.ru/EOS/WM/50_132-670.pdf).
3. Koroleva, D. (2020), *Analysis of recommendation systems learning algorithms*, available at: <http://engjournal.ru/articles/816/816.pdf>.
4. (2021), *Singular value decomposition*, available at: [http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B5\\_%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5](http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5)
5. (2021), *Gradient descent: everything you need to know*, available at: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/gradient-descent/>
6. (2021), *The method of k-nearest neighbors*, available at: [http://om.univ.kiev.ua/users\\_upload/15/upload/file/pr\\_lecture\\_03.pdf](http://om.univ.kiev.ua/users_upload/15/upload/file/pr_lecture_03.pdf)

7. Krepych, S.Ya., Dzhulii, M.V. (2017), "Software system to support the selection of books on fuzzy criteria", *Modern computer information technologies: Proceedings of the All-Ukrainian conference with inte. participation ASIT'2017*, Ternopil: TNEU, p. 144-145.

Received (Надійшла) 29.06.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.10.2021

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ ABOUT THE AUTHORS

**Крепич Світлана Ярославівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук, Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна;

**Svitlana Krepych** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Computer Science Department, Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine:

e-mail: [msya220189@gmail.com](mailto:msya220189@gmail.com); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7700-8367>

**Співак Ірина Ярославівна** - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук, Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна;

**Iryna Spivak** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Computer Science Department, Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine:

e-mail: [spivak.iruna@gmail.com](mailto:spivak.iruna@gmail.com); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4831-0780>

#### Удосконалення алгоритму SVD для підвищення ефективності рекомендаційних систем

С. Я. Крепич, І. Я. Співак

**Анотація.** Велика кількість на сьогодні існуючих веб-сайтів використовують рекомендаційні системи для своїх користувачів. Вони генерують їм різні пропозиції, наприклад, подібні товари або рекомендують людей, зареєстрованих на цьому сайті, зі схожими інтересами. Такі рекомендаційні механізми обробляють величезні обсяги інформації для позначення потенційних переваг користувачів. Рекомендаційні системи - це програми, які намагаються визначити, що хочуть знайти користувачі, що може їх зацікавити і рекомендують їм це. Ці механізми вдосконалили взаємодію між користувачем і сайтом. Взаємін статичної інформації вони надають динамічну інформацію, яка змінюється: рекомендації генеруються окремо для кожного користувача, ґрунтуючись на його попередній активності на даному веб-ресурсі. Також може враховуватися інформація, що надходить від інших відвідувачів. Методи збору інформації, що надаються Інтернетом, значно спростили використання людської думки за допомогою колаборативної фільтрації. Але, з іншого боку, великий обсяг інформації ускладнює втілення цієї можливості. Наприклад, поведінка одних людей досить ясно піддається моделюванню, в той час як інші поводяться абсолютно непередбачувано. І саме другі впливають на змінення результатів рекомендаційної системи і зниження її ефективності. Аналіз інтернет-ресурсів показав, що більшість рекомендаційних систем не надає користувачам рекомендацій, а та частина, яка це робить, наприклад пропонує користувачеві продукти, здійснює підбір рекомендацій вручну. Отже задача розробки методів автоматизованого створення рекомендацій за обмеженим набором вхідних даних є досить актуальною. Проблеми роботи (розрідженість даних, проблема нового користувача, масштабованість) широко використовуваного алгоритму SVD для розробки таких рекомендаційних систем пропонується усунути шляхом удосконалення даного алгоритму методом найближчих k-сусідів. Даний метод дозволить легко сегментувати і кластеризувати дані системи, що зекономить ресурси системи.

**Ключові слова:** рекомендаційна система; алгоритм SVD; метод k-найближчих сусідів; розрідженість даних; масштабованість; кластеризація.

#### Усовершенствование алгоритма SVD для повышения эффективности рекомендательных систем

С. Я. Крепич, И. Я. Спивак

**Аннотация.** Большое количество на сегодня существующих веб-сайтов используют рекомендательные системы для своих пользователей. Они генерируют им различные предложения, например, подобные товары или рекомендуют людей, зарегистрированных на этом сайте, по похожим интересам. Такие рекомендательные механизмы обрабатывают огромные объемы информации для обозначения потенциальных преимуществ пользователей. Рекомендательные системы - это программы, которые пытаются определить, что хотят найти пользователи, что может их заинтересовать и рекомендуют им это. Эти механизмы усовершенствовали взаимодействие между пользователем и сайтом. Взамен статической информации они предоставляют динамическую информацию, которая меняется: рекомендации генерируются отдельно для каждого пользователя, основываясь на его предыдущей активности на данном веб-ресурсе. Также может учитываться информация, поступающая от других посетителей. Методы сбора информации, предоставляемых интернетом, значительно упростили использование человеческой мысли с помощью колаборативной фильтрации. Но, с другой стороны, большой объем информации затрудняет воплощение этой возможности. Например, поведение одних людей достаточно ясно подвергается моделированию, в то время как другие ведут себя абсолютно непредсказуемо. И именно вторые влияют на смещение результатов рекомендательной системы и снижение ее эффективности. Анализ интернет-ресурсов показал, что большинство рекомендательных систем не предоставляет пользователям рекомендаций, а та часть, которая это делает, например, предлагает пользователю продукты, осуществляет подбор рекомендаций вручную. Итак, задача разработки методов автоматизированного создания рекомендаций по ограниченному набору входных данных является весьма актуальной. Проблемы работы (разреженность данных, проблема нового пользователя, масштабируемость) широко используемого алгоритма SVD для разработки таких рекомендательных систем предлагается устранить путем усовершенствования данного алгоритма методом ближайших k-соседей. Данный метод позволит легко сегментировать и кластеризовать данные системы, что сэкономит ресурсы системы.

**Ключевые слова:** рекомендательная система; алгоритм SVD; метод k-ближайших соседей; разреженность данных; масштабируемость; кластеризация.

О. Г. Лебедєв, В. О. Лебедєв

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## Методика аналізу ризиків в інформаційних системах

**Анотація. Актуальність.** На сьогодні залишається невирішеним завдання управління ризиками в інформаційній системі управління з урахуванням взаємозв'язку різних алгоритмів та моделей для досягнення конкретних результатів щодо управління інформаційно-телекомунікаційними комплексами управління технічними об'єктами. **Мета статті** – розробка методики аналізу та управління ризиками в інформаційних системах управління. Досліджуються шляхи забезпечення ефективності функціонування систем управління в умовах інформаційного протистояння з використанням апарата теорії ігор. Розробляється методика оцінки середнього значення показника якості функціонування системи управління та отримані вирази для оцінки середнього значення показника при різних стратегіях поведінки. Показано, що вирішення проблеми підвищення якості функціонування системи управління, можливе за рахунок застосування змішаної стратегії поведінки системи управління та вибору структури і параметрів системи управління, що збільшують часткові показники якості її функціонування.

**Ключові слова:** аналіз ризиків; інформаційні системи; системи управління; самовідновлювальна система; загрози інформації; синтез системи.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Сучасні системи управління є, як правило, складовою інформаційно-телекомунікаційних комплексів управління технічними об'єктами та людьми. Такі комплекси набули розвитку завдяки прогресу в області комп'ютерної техніки, автоматизації управління й технологічних процесів. Прагнення забезпечити високу ефективність таких комплексів управління, мінімізувати фінансові затрати, забезпечити енергетичний та інформаційний захист системи управління, висуває на перший план створення системи аналізу та управління ризиками в інформаційних системах. Методи та алгоритми управління ризиками досить повно описані у міжнародних стандартах та у спеціальній літературі [1-5]. Водночас наразі залишається невирішеним завдання управління ризиками в інформаційній системі управління з урахуванням взаємозв'язку різних алгоритмів та моделей для досягнення конкретних результатів щодо управління інформаційно-телекомунікаційними комплексами управління технічними об'єктами [6-8].

**Мета статті** – розробка методики аналізу та управління ризиками в інформаційних системах управління.

### Виклад основного матеріалу

Для оцінки ймовірності виникнення загрози спочатку наведемо зручну для подальшого розгляду класифікацію загроз інформації. Оскільки кінцевою метою оцінки є (в ідеальному випадку) визначення ймовірності виникнення загрози, виділимо такі джерела загроз: природні – це стихійні лиха, аварії, збої та відмови технічних засобів, інші події, спричинені об'єктивними фізичними явищами, невідконтрольними людині; штучні – погрози, спричинені діяльністю людини. Ці загрози поділяються на ненавмисні (випадкові), спричинені помилками у проектуванні систем та елементів, помилки у програмному забезпеченні, помилки в діях персоналу тощо, та навмисні, пов'язані зі свідомим заподіянням шкоди.

Нехай  $F$  функціонал, описуючий якість системи управління в умовах дії загроз [9,10]

$$F(G(h,r), I(R), S(L), V(r,t), T(t)), \quad (1)$$

де  $G(h,r)$  – функція, яка характеризує енергетичні параметри системи управління;  $I(R)$  – функція, яка характеризує стійкість від зовнішніх впливів;  $S(L)$  – функція, яка характеризує структурну надійності програмного забезпечення системи управління;  $V(r,t)$  – функція, яка характеризує швидкісні характеристики системи управління;  $T(t)$  – функція, яка характеризує часові параметри системи управління.

Таким чином задача синтезувати самовідновлювальну систему управління полягає в розробці методів та алгоритмів, максимізуючий функціонал виду (1). Математично це можна виразити через цільову функцію  $\gamma(x)$ , яка записується у вигляді

$$\gamma(x) = \max F(G(h,r), I(R), S(L), V(r,t), T(t)). \quad (2)$$

При цьому повинні виконуватися такі обмеження:

$$\begin{aligned} G(h,r) &\geq g_{\text{дон}}, \quad I(R) \leq I_{\text{дон}}, \quad S(L) \geq S_{\text{дон}}, \\ V(r,t) &\leq V_{\text{дон}}, \quad T(t) \leq T_{\text{дон}}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $g_{\text{дон}}$  – мінімально допустиме значення енергетичних параметрів системи управління;  $I_{\text{дон}}$  – необхідне значення стійкості від зовнішніх впливів;  $S_{\text{дон}}$  – задане значення структурної надійності програмного забезпечення системи управління;  $V_{\text{дон}}$  – мінімально допустиме значення швидкісних характеристик системи управління;  $T_{\text{дон}}$  – максимально допустимий час для виконання команд управління.

Таким чином, вираз (2) з урахуванням обмежень (3), в узагальненому вигляді описує основну задачу досліджень – синтез системи управління, забезпечуючи в комплексі максимальну якість системи управління при заданих ймовірнісно-часових характеристиках, в умовах впливу потужних засобів боротьби.

Проведені дослідження показали [11], що задача синтезу, забезпечуючих умов (2) при обмеженні їх (3) являється екстремальною задачею. Варіаційний характер задачі побудови самовідновлювальної системи управління вбачає використання в якості математичного програмування ідей і методів функціонального аналізу, теорії оптимального управління, чисельні методи оптимізації, алгебраїчні методи синтезу та аналізу дискретних систем, що включає теоретико-числові та комбіновано-множинні методи.

Важкість задачі синтезу системи управління, що забезпечують умову (2) пояснюються, по-перше, взаємним зв'язком аргументів, що входять в функцію вигляду (1), по-друге, широким спектром вихідних обмежень, характеризуючих особливості функціонування системи управління.

Основним визначальним джерелом появи інформаційних ризиків є інформаційний актив, до яких належить будь-яка інформація, що становить цінність для організації. Робота з мінімізації ІТ-ризиків полягає у попередженні несанкціонованого доступу до активів, аварій та збоїв обладнання, забезпеченні доступності необхідних для роботи сервісів та додатків. Процес мінімізації інформаційних ризиків слід розглядати комплексно: спочатку виявляються можливі проблеми, а потім визначається, якими способами їх можна вирішити чи попередити.

Класифікація ризиків означає об'єднання сукупності ризиків на підставі певних ознак та критеріїв. Такими критеріями, покладеними в основу класифікації інформаційних ризиків, можуть бути критерії, наведені на рис. 1.



Рис. 1. Класифікація інформаційних ризиків

Для вирішення оптимізаційних завдань, пов'язаних з вибором параметрів систем управління та алгоритмів функціонування системи, з метою мінімізації ризику застосовується апарат теорії ігор. Ігровий підхід пропонує кожному гравцю дії, розраховані на найменш вигідну для нього реакцію супротивника. До кількості завдань, що легко перекладаються мовою теорії ігор, відноситься й синтез алгоритмів функціонування системи управління в умовах конфлікту між системою управління і протидіючою стороною за умови забезпечення гарантованих ймовірнісно-часових показників системи.

У термінах теорії ігор подібна ситуація адекватна вибору двома гравцями найкращих стратегій з множини всіх можливих на основі деякого середнього показника якості  $\bar{y}$ .

Нехай пропонується заданим, з одного боку, апіорний алфавіт можливих станів системи управління  $A$  і ймовірність їхнього створення

$$P = p(P_{00}, P_{01}, \dots, P_{0m}, P_{12}, \dots, P_{N0}, P_{N1}, \dots, P_{NN}),$$

з іншого – різні стратегії протидії й типи використовуваних загроз  $S$  і ймовірності їхнього створення

$$Q = q(q_{ij}), \quad i = \overline{1, M}, j = \overline{1, J}.$$

Тоді матриця гри описується табл. 1, де  $y_{ij}^{kc}$  – частковий показник якості застосування алгоритму функціонування системи управління й використання  $j$ -го класу сигнально алгоритму функціонування при  $k$ -й стратегії протидії  $i$ -ї ризику.

Таблиця 1 – Матриця гри

Алгоритм функціонування	Ймовірності	Стратегії противника			
		$S_0$	$S_1$	...	$S_m$
		$Q_0$	$Q_1$	...	$Q_m$
	$P_{00}$	$q_{00}, q_{01}, \dots, q_{0m}$	$q_{10}, \dots, q_{1m}$	...	$q_{m0}, \dots, q_{mm}$
	$P_{01}$	$q_{00}^{01}, q_{01}^{01}, \dots, q_{0m}^{01}$	...	...	$q_{m0}^{01}, \dots, q_{mm}^{01}$
$A_0$	$P_0$	...	...	...	...
	$P_{0m}$	$q_{00}^{0m}, q_{01}^{0m}, \dots, q_{0m}^{0m}$	$q_{10}^{0m}, \dots, q_{1m}^{0m}$	...	$q_{m0}^{0m}, \dots, q_{mm}^{0m}$
...	...	...	...	...	...
	$P_{10}$	$q_{00}^{10}, q_{01}^{10}, \dots, q_{0m}^{10}$	$q_{10}^{10}, \dots, q_{1m}^{10}$	...	$q_{m0}^{10}, \dots, q_{mm}^{10}$
$A_i$	$P_i$	...	...	...	...
	$P_{N0}$	$q_{00}^{N0}, q_{01}^{N0}, \dots, q_{0m}^{N0}$	$q_{10}^{N0}, \dots, q_{1m}^{N0}$	...	$q_{m0}^{N0}, \dots, q_{mm}^{N0}$
$A_N$	$P_N$	...	...	...	...
	$P_{Nc}$	$q_{0c}^{Nc}, q_{1c}^{Nc}, \dots, q_{mc}^{Nc}$	$q_{1c}^{Nc}, \dots, q_{mc}^{Nc}$	...	$q_{mc}^{Nc}, \dots, q_{cc}^{Nc}$

Аналіз концепції протидії противника показує, що даний конфлікт є нерозв'язним у чистих концепціях.

Нехай система управління застосовує змішані стратегії, тобто змінює алгоритм функціонування або клас використовуваних стратегій, що задані на множині  $\{A\}$ . Отже, показником якості в цьому випадку буде результат усереднення за всіма частковими показниками.

Противник може здійснювати вибір перешкоди як без оцінки результатів впливу на систему управління, так і з оцінкою впливу. Спочатку припустимо, що противник здійснює вибір стратегії подавлення системи управління без урахування їх впливу на систему. У цьому випадку система управління може реалізувати такі стратегії поведінки в конфліктній ситуації:

– система управління не змінює алгоритм функціонування, але змінює клас використовуваних алгоритмів функціонування таким чином, щоб досягти максимального значення середнього показника якості вибором ймовірності  $P_{ij}$  при заданому наборі стратегій протидії;

– система управління змінює алгоритм функціонування, клас використовуваних алгоритмів функціонування з метою максимізації середнього показника якості при фіксованих стратегіях протидії;

– система управління змінює алгоритм функціонування й клас використовуваних алгоритмів функціонування залежно від стратегії протидії з метою

досягнення максимального значення часткового показника якості.

**Твердження 1.** Нехай у системі управління реалізується  $A_i$  стратегія функціонування з  $i$ -м алгоритмів функціонування. Причому система управління не змінює алгоритм функціонування. Тоді середнє значення показника якості визначається виразом

$$\bar{y} = \sum_{j=0}^m \sum_{z=0}^{R_j} Q_j q_{jr} y_{rc}^i R^i, \quad (4)$$

де  $R_j$  залежно від  $j$  дорівнює  $l, b, \dots, q \dots$

**Твердження 2.** Нехай у системі управління реалізується  $A_i$  стратегія функціонування. У процесі функціонування, залежно від стратегії протидії, клас використовуваних алгоритмів функціонування змінюється. Тоді середнє значення показника якості визначається виразом

$$\bar{y} = \max_{P_{ic} \in P_i} \sum_{c=0}^{z_i} \left( \sum_{j=0}^m \sum_{r=0}^{R_j} Q_j q_{jr} y_{rc}^{ji} \right) P_{ic} P_i, \quad (5)$$

де  $z_i$  дорівнює  $m, \dots, Z$  залежно від  $i$ .

**Твердження 3.** Нехай система управління змінює алгоритм функціонування з метою максимізації середнього показника якості при фіксованих стратегіях протидії. Тоді середнє значення показника якості визначається виразом:

$$\bar{y} = \sum_{i=v}^N \left\{ \max_{P_{ic} \in P_i} \sum_{c=0}^{z_i} \left( \sum_{j=0}^m \sum_{r=0}^{R_j} Q_j q_{jr} y_{rc}^{ji} \right) P_{ic} P_i \right\}. \quad (6)$$

**Твердження 4.** Нехай система управління змінює алгоритм функціонування залежно від стратегій протидії з метою максимізації значення часткового показника якості. Тоді середнє значення показника якості визначається виразом:

$$\bar{y} = \sum_{j=0}^m \sum_{z=0}^{R_j} Q_j q_{jr} \left\{ \left[ P_i^* P_i^* C^* \max_{i \in N} \left( y_{rc}^{ji} \right) \right] + \sum_{c=0}^{c^*} \sum_{i=0, i \neq i^*} P_i P_{io} y_{zc}^{ji} \right\}, \quad (7)$$

де  $P_i^*$  й  $P_i^* C^*$  – ймовірності використання  $i$ -стратегії і  $C$ - алгоритм функціонування системи управління, що мають максимальне значення часткового показника  $y_{rc}^{ji}$  при впливі  $j$ -ї стратегії протидії й  $r$ -ї алгоритму.

При виборі супротивником стратегій протидії з урахуванням оцінки їх впливу на систему управління за умови максимального її подавлення можуть використовуватися ті ж стратегії поведінки системи

управління в конфліктній ситуації, що і в першому випадку. Варто врахувати, що супротивник вибирає стратегію подавлення, за якої показник якості функціонування має мінімальне значення.

З використанням апарата теорії ігор проведений аналіз і розроблена методика оцінки середнього значення показника якості функціонування системи зв'язку при різних стратегіях конфліктуючих сторін.

Проведені дослідження дозволили отримати вирази для оцінки середнього значення якості функціонування системи управління при різних стратегіях поведінки й оцінки впливу протидії.

Визначимо межі зміни середнього показника якості функціонування системи зв'язку при впливі завод. Позначаючи через  $\bar{y}_{зад}$  задане значення середнього показника якості функціонування системи зв'язку й управління в умовах протидії, отримуємо межі зміни  $\bar{y}$ .

При протидії без оцінки результатів впливу завод відповідно до тверджень 1 й 4:

$$\bar{y} = \sum_{j=0}^m \sum_{z=0}^{R_j} Q_j q_{jr} \left\{ \left[ P_i^* C^* \max_{i \in r} \left( y_{rc}^{ji} \right) \right] + \sum_{i=0}^N \sum_{c=0}^{z_i} P_i P_{ic} \bar{y}_{rc}^{-ij} \geq \bar{y}_{зад} > \sum_{j=0}^m \sum_{z=0}^{R_j} Q_j q_{jr} y_{rc}^{ji} \right\}, \quad (8)$$

При виборі стратегії протидії:

$$\bar{y} = Q_j q_{jr} P_i^* P_i^* C^* \min_{j \in m} \left( m_j \right) \max_{i \in N} \left( N_i y_{rc}^{ji} \right) + \sum_{j=0}^m \sum_{r=0}^{R_j} Q_j q_{jr} \times \sum_{m}^N \sum_{R_i} P_i P_{ic} y_{rc}^{ij} \geq \bar{y}_{зад} > > Q_j \left\{ q_{jr}^* \min_{r \in R} \left( y_{rc}^* \right) \right\} + \sum_{j=0}^m \sum_{z=0}^{R_j} Q_j y_{rc}^{ij}. \quad (9)$$

### Висновки

Таким чином розв'язання завдання підвищення якості функціонування системи управління можливе за рахунок:

- застосування змішаної стратегії поведінки системи управління;
- вибору структури і параметрів системи управління, що збільшують часткові показники якості її функціонування;
- збільшення ймовірності розпізнавання діючої стратегії подавлення і класу алгоритмів функціонування та зміни алгоритму функціонування системи управління.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Найт Ф. Понятие риска и неопределенности. *Теория и история экономических и социальных институтов и систем.* 1994. № 5. С. 22-29.
2. Менеджмент качества [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kpms.ru/Automatization>
3. Управление рисками на предприятии [Электронный ресурс]. URL: <http://www.risk24.ru/>
4. Активы организации как ключевые факторы риска [Электронный ресурс]. URL: <https://www2.deloitte.com/content>
5. Берлимер Б. Риски в современном бизнесе. М.: Аланс, 1994. 200 с.
6. Suroso, J. S., & Fakhrozi, M. A. (2018). Assessment of Information System Risk Management with Octave Allegro at Education Institution, 3rd Inte. Conf. on Computer Science and Computational Intelligence, 135, pp. 202-213.

7. Suroso, J. S., Rahadi, B. (2017). Development of IT Risk Management Framework Using COBIT 4.1, Implementation In IT Governance For Support Business Strategy. ACM International Conference Proceeding Series. Part F130654.
8. Мазов Н.А., Ревнивых А.В., Федотов А.М. Классификация рисков информационной безопасности. *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии*, 2011. Т. 9, вып. 2. С. 80-89.
9. Datta, S. P. (2010). Risk Management Process for Information Security System. *International Journal of Computer Science and Communication*, 1(1), 33-38.
10. Cherdantseva, Y., Burnap, P., Blyth, A., Eden, P., Jones, K., Soulsby, H., & Stoddart, K. (2016). A review of cyber security risk assessment methods for SCADA systems. *Computers & Security*, 56, 1–27.
11. Покровский, П. Оценка информационных рисков. *LAN*. 2010. № 10. С/ 25-31/

Received (Надійшла) 26.08.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.11.2021

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ ABOUT THE AUTHORS

**Лебедев Олег Григорович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Oleh Lebediev** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electronic Computers Department, National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [oleh.lebediev@nure.ua](mailto:oleh.lebediev@nure.ua); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5998-0136>

**Лебедев Валентин Олегович** – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Valentyn Lebediev** – postgraduate student of Electronic Computers Department, National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [valentyn.lebediev@nure.ua](mailto:valentyn.lebediev@nure.ua); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0095-7481>

#### Методика анализа рисков в информационных системах

О. Г. Лебедев, В. О. Лебедев

**Аннотация.** Разрабатывается методика анализа рисков в информационных системах. Исследуются пути обеспечения эффективности функционирования систем управления в условиях информационного противоборства с использованием аппарата теории игр. Стремление обеспечить высокую эффективность современных информационных комплексов управления, минимизировать финансовые затраты, обеспечить энергетическую и информационную защиту системы управления, выдвигает на первый план создание системы анализа и управления рисками в информационных системах. Предполагается, что система управления может реализовать следующие стратегии поведения в конфликтной ситуации: система управления не изменяет алгоритм функционирования, но изменяет класс используемых алгоритмов функционирования таким образом, чтобы добиться максимального значения среднего показателя качества выбором вероятности  $P_{ij}$  при заданном наборе стратегий противодействия, система управления изменяет алгоритм функционирования, класс используемых алгоритмов функционирования с целью максимизации среднего показателя качества при фиксированных стратегиях противодействия, система управления изменяет алгоритм функционирования и класс используемых алгоритмов функционирования в зависимости от стратегии противодействия с целью достижения максимального значения качества. С использованием аппарата теории игр проведен анализ и разработана методика оценки среднего значения показателя качества функционирования системы связи при разных стратегиях конфликтующих сторон. Разрабатывается методика оценки среднего значения показателя свойства функционирования системы управления и полученные выражения для оценки среднего значения показателя при разных стратегиях поведения. Показано, что решение проблемы повышения качества функционирования системы управления возможно за счет применения смешанной стратегии поведения системы, выбора структуры и параметров системы управления, увеличивающих частные показатели качества ее функционирования.

**Ключевые слова:** анализ рисков; информационные системы; системы управления; самовосстанавливающаяся система; угрозы информации; синтез системы.

#### Analysis of risks methodology in information systems

Oleh Lebediev, Valentyn Lebediev

**Abstract.** A method of risk analysis in information systems is being developed. The ways of ensuring the efficiency of control systems in the conditions of information confrontation with the use of the game theory apparatus are investigated. The desire to ensure high efficiency of modern management information systems, minimize financial costs, provide energy and information protection of the management system, highlights the creation of a system of analysis and risk management in information systems. It is assumed that the control system can implement the following behavioral strategies in a conflict situation: the control system does not change the algorithm, but changes the class of algorithms used to achieve the maximum value of the average quality by choosing the probability  $P_{ij}$  for a given set of countermeasures, the control system changes the algorithm operation, the class of operating algorithms used to maximize the average quality of fixed countermeasures, the control system changes the operating algorithm and the class of operating algorithms used depending on the countermeasure strategy in order to achieve maximum quality. Using the apparatus of game theory, an analysis was performed and a method for estimating the average value of the quality of the communication system with different strategies of the conflicting parties was developed. The technique of estimation of average value of an indicator of quality of functioning of a control system is developed and expressions for an estimation of average value of an indicator at various strategies of behavior are received. It is shown that the solution to the problem of improving the quality of the control system is possible through the use of a mixed strategy of system behavior and the choice of structure and parameters of the control system that increase the partial quality of its operation.

**Keywords:** risk analysis; information systems; control systems; self-healing system; information threats; synthesis systems.



Oleksandr Maidanyk, Yelyzaveta Meleshko, Serhii Shymko

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

## STUDY OF INFLUENCE OF QUADROPTER DESIGN AND SETTINGS ON QUALITY OF ITS WORK DURING MONITORING OF GROUND OBJECTS

**Abstract.** The **subject** of the article is methods of reducing quadcopter magnetometer crosstalk by changing the design and settings of the copter to improve the quality of its work during the monitoring of ground objects. The relevance of the development is determined by the need to increase the physical safety of quadcopters when monitoring ground facilities in various industries because the magnetometer is the most noise-sensitive sensor, and its failure leads to the fall and loss of the drone. The **purpose** of the article is to determine the optimal design and settings of the quadcopter in terms of its physical safety and quality of work during monitoring of ground facilities in various industries. The research **task** is to check whether it is possible to protect the magnetometer placed inside the drone body from the power cables crosstalk by grounding, shielding and changing the initial settings of the copter, namely by changing the value of the startup power factor of the motors. **Research methods** are as follows: theory of automatic control, methods of optimal control and hardware design methods. **Conclusions.** The role of the drone magnetometer in the monitoring of ground objects has been studied. The study has shown that copters at monitoring ground objects must be equipped with a magnetometer and GPS. The magnetometer is the most sensitive to interference of all sensors. If it does not work properly, the entire drone navigation system stops working. We have carried out experimental studies of the influence of quadcopter design and settings on the quality of its magnetometer work, and hence on work of the copter as a whole. In this paper it is proposed to place a magnetometer inside the body of the drone that will increase its physical safety and simplify the design of the drone, but at the same time it will increase the coupling from the power cables of motors, so it is necessary to choose effective methods of protection. It has been tested whether it is possible to protect the magnetometer from interference from power cables when placing it inside the drone body by grounding, shielding and changing the initial settings of the copter, namely by changing the value of the startup power factor of the motors. The results of the experiments showed that to protect against the interference for magnetometer placed inside the drone body, it is necessary to combine shielding of the magnetometer and decreasing of the startup power factor of the motors.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; drone, quadcopter; magnetometer; crosstalk; quality of work; monitoring of ground objects.

### Introduction

An essential component of a quadcopter that monitors ground objects and is not controlled by the operator but follows a certain route is a magnetometer [1, 2], which allows navigating in the airspace and plays the role of a compass. At the same time, the magnetometer's quality and physical safety depend on the design and settings of the quadcopter. In particular, most often the magnetometer is placed in a separate module together with the GPS, which is taken outside the body of the drone and located on a special rack or top cover of the body [3]. Because of such a location, the probability of damage or loss of the magnetometer as a result of physical fractures increases, and the complexity of the design of the quadcopter rises.

This paper proposes to place a magnetometer inside the drone's body, which will increase its physical safety and simplify the drone's design. However, such placement can negatively affect the quality of the magnetometer because it is a very sensitive device [4], and its operation can be negatively affected by interference (crosstalk) from power cables of quadcopter engines [1, 4]. Therefore we conducted experimental studies of the influence of quadcopter design and settings on the quality of its magnetometer, and hence of the copter as a whole. It was checked during the experiments whether it is possible to protect the magnetometer from interference from the power supply cables by grounding, shielding and changing the initial settings of the copter.

**Analysis of the literature.** According to a study of the following sources [5-10], the use of unmanned aerial

vehicles of the quadcopter type to monitor ground facilities in various industries is an extremely relevant task.

*Use of drones in industrial monitoring.* Unmanned aerial vehicles use conventional and thermal aerial photography of industrial objects from a bird's eye view. The copter transmits video and other received data to operators in real-time, then the results are sent to control points where they are analyzed and used by experts in making important decisions. This helps to react quickly and correctly in case of any emergencies. Drones effectively solve the following problems in industry [5-7]:

- operational and comprehensive control of the state of mining equipment, power lines, oil platforms and refineries, pipelines, roads and railways, construction sites and shore structures.

- continuous surveillance in hard-to-reach and dangerous places, where it is associated with a risk to human life and health.

- drones equipped with thermal imagers are used for infrared aerial photography of municipal facilities, diagnostics of the state of power lines, underground thermal networks, oil and gas pipelines. Conventional and thermal infrared aerial photography of industrial facilities allows timely detect defects and malfunctions of equipment, leaks, harmful emissions, oil slicks in areas of oil production and transportation, and other problems at the initial stage of their occurrence, without stopping production, as well as carry out search-and-rescue and security activities.

*Use of drones in the monitoring of agricultural facilities.* Drones in agriculture – one of the most

promising areas, which is actively growing in demand. Technologically equipped drones in agriculture can perform various monitoring operations [8-10]:

- Aerial photography is necessary to detect crop failure and other defects that need to be eliminated in a timely manner. Aerial photography from a drone is more detailed than photography from a satellite due to the low altitude.

- Video recording - the productivity of the aircraft during video recording reaches 30 km<sup>2</sup> per 1 hour, which significantly reduces time and financial costs compared to the use of ground surveys or piloted aircraft.

- 3D modeling - allows determining wetlands or arid areas, excavation, allows qualitatively creating plans and maps of soil humidification or drainage, of sites recultivation and land melioration.

- Thermal imaging (multispectral) imaging - is carried out using the full spectrum of infrared radiation: near, medium and far range. Exploration from the drone directly affects the yield and preservation of the productive properties of plants.

- Laser scanning - used to analyze the area in hard-to-reach or inaccessible areas. It provides an exact model of high density with detailed display of a relief even when working in the strong density of plantings.

Modern copters can solve the following tasks of monitoring agricultural facilities:

- assessment of crop quality and detection of damage or death of crops;
- determining the exact area of dead crops;
- audit and inventory of lands required for the implementation of agreements;
- detection of crop defects and problematic areas;
- analysis of the effectiveness of measures aimed at plant protection;
- monitoring the compliance of the structure and plans of crop rotation;
- detection of deviations and violations committed in the process of agro-technical works;
- relief analysis and creation of a map of PVI, NDVI vegetation indices;
- gathering information for the security service, e.g., on the fact of illegal cattle grazing in the fields;
- support for the construction of melioration systems;
- monitoring of root crops storage in clamps.

Copters that monitor ground objects and are not controlled by the operator, but follow the pre-defined route, must be equipped with a magnetometer and GPS [1-3]. Operator-controlled copters must also include a magnetometer, but GPS is no longer required, in which case the compass allows for flight stability [3]. Using a magnetometer, one can determine which side of the drone is facing north [1-3] and supplement with this information the data on its location, obtained from GPS. The drone's navigation system keeps it in place against gusts of wind, the operation of intelligent modes of the drone, for example, following a certain route without an operator, including returning home in case of loss of communication.

The magnetometer is the most sensitive to interference sensor [1-4]. In addition to the fact that the

natural magnetic field may be different in different flight areas, it can also be affected by extraneous magnetic fields, for example, high-voltage power lines or even from the onboard electronics of the copter itself. That is why drone assemblers often try to move the compass away from the onboard electronics, for example, on a leg that stands alone above other parts.

If the compass functions incorrectly, the whole drone navigation system stops working [4]. This means that the drone will not return home if the signal is lost, will stop flying the route, and so on.

Therefore, after reviewing the literature, it can be concluded that the magnetometer is an extremely important drone sensor, and its use is mandatory when monitoring ground objects. At the same time, it is the most noise-sensitive sensor and its placement and protection against interference is an extremely important task, the effectiveness of which depends on the quality of work and physical safety of the drone.

### Experiment description

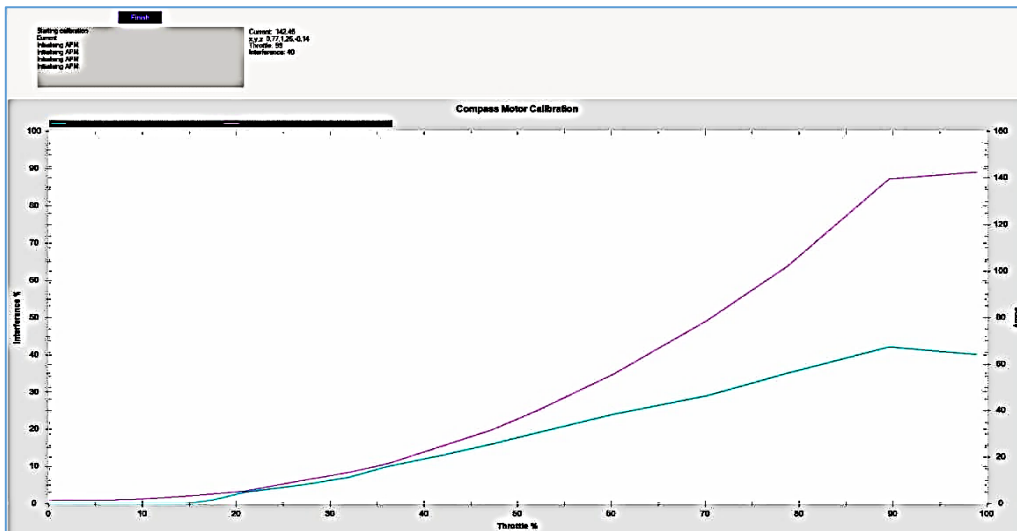
A quadcopter with the following parameters was used for the experiments: flight controller – matek f405-se; engine controllers – FVT LittleBee 30A ESC BLHeli-S; magnetometer + GPS module – RadioLink TS100 M8N (it has a QMC5883L magnetometer); engines T motor 2814; propellers 11/4,5 (11" diameter, 4.5" pitch). The appearance of the assembled drone is shown in Fig. 1.



Fig. 1. Quadcopter assembled for experiments

To perform the experiment, the quadcopter was rigidly fixed to prevent it from moving when starting and supplying current to its motors, and was connected to a computer to record the values of current, interference, and throttle percentage. The task of the experiment was to determine the value of interference to the magnetometer depending on the current level. The gas was supplied in such a way as to achieve the maximum possible safe current level, but at the same time with care to not disable the power part of the drone (engine controllers and engines).

Several experiments were performed with different designs and settings of the quadcopter. During the experiments the values of interference at the quadcopter magnetometer were compared when placed it either outside the drone body or inside the body with different methods of protection against interference. The measurement results were recorded in mission planner software. ver 1.3.75 [11] (Fig. 2-6).



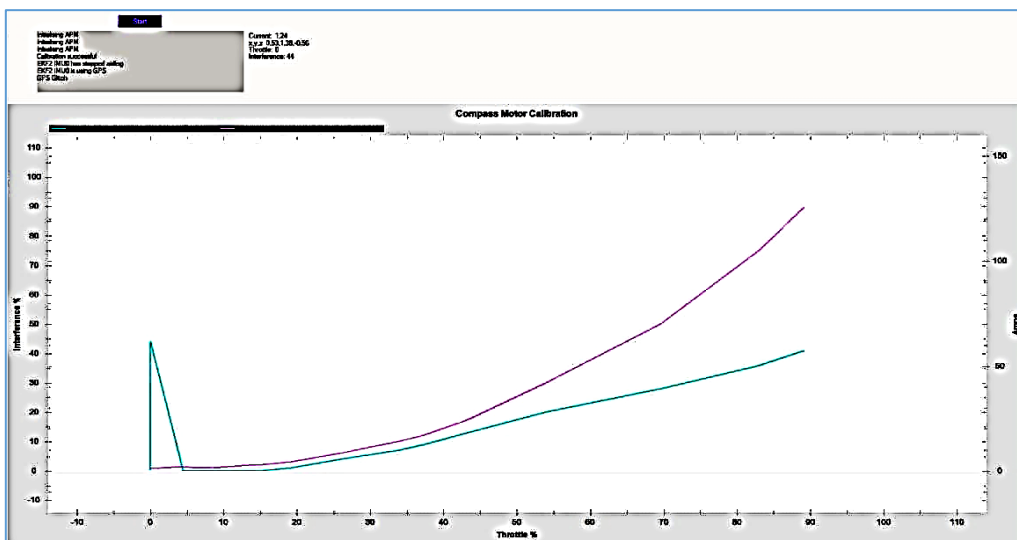
**Fig. 2.** Experiment No. 1. Magnetometer outside the drone body on the rack behind and without shielding (screenshot from mission planner ver 1.3.75, colors inverted): blue line – interference, pink – current

In experiment №1 (Fig. 2), the maximum interference was 40%, and the maximum current was 142 A. As expected, when placing the magnetometer inside the drone body, the interference is larger – in the experiment №2, (Fig. 3) the maximum interference is 44%, and the maximum current is 142 A, although the magnetometer was shielded from electronics from the bottom, which does not shield it completely from the Earth's magnetic field. Therefore, the next step in the experiment was to determine how interference can be reduced. Therefore, experiments were performed with the grounding of the magnetometer shield (Fig. 4).

It is known that all the wire polygons can also be a source of the noise. Therefore, it was decided to connect them to the minus (ground) of the general onboard power supply. In experiment № 3 (Fig. 4), the shielding of the magnetometer was grounded, and the following results were obtained: maximum interference – 44%, and maximum current 75 A. As one can see from the results of the experiment, grounding did not reduce the interference. Subsequent experiments were designated to

reduce the startup power factor of quadcopter motors from 0.5 to 0.1 (Fig. 5) and to 0.2 (Fig. 6), that gave the necessary result and solved the interference problem. In experiment № 3 (Fig. 4), the shielding of the magnetometer was grounded, and the following results were obtained: maximum interference – 44%, and maximum current 75 A. As one can see from the results of the experiment, grounding did not reduce the interference. Subsequent experiments were designated to reduce the startup power factor of quadcopter motors from 0.5 to 0.1 (Fig. 5) and to 0.2 (Fig. 6), that gave the necessary result and solved the interference problem.

In experiment № 3 (Fig. 4), the shielding of the magnetometer was grounded, and the following results were obtained: maximum interference – 44%, and maximum current 75 A. As one can see from the results of the experiment, grounding did not reduce the interference. Subsequent experiments were designated to reduce the startup power factor of quadcopter motors from 0.5 to 0.1 (Fig. 5) and to 0.2 (Fig. 6), that gave the necessary result and solved the interference problem.



**Fig. 3.** Exp. № 2. Magnetometer inside the drone body at the top of the flight controller, shielded (screenshot from mission planner ver 1.3.75, colors inverted): blue line – interference, pink – current

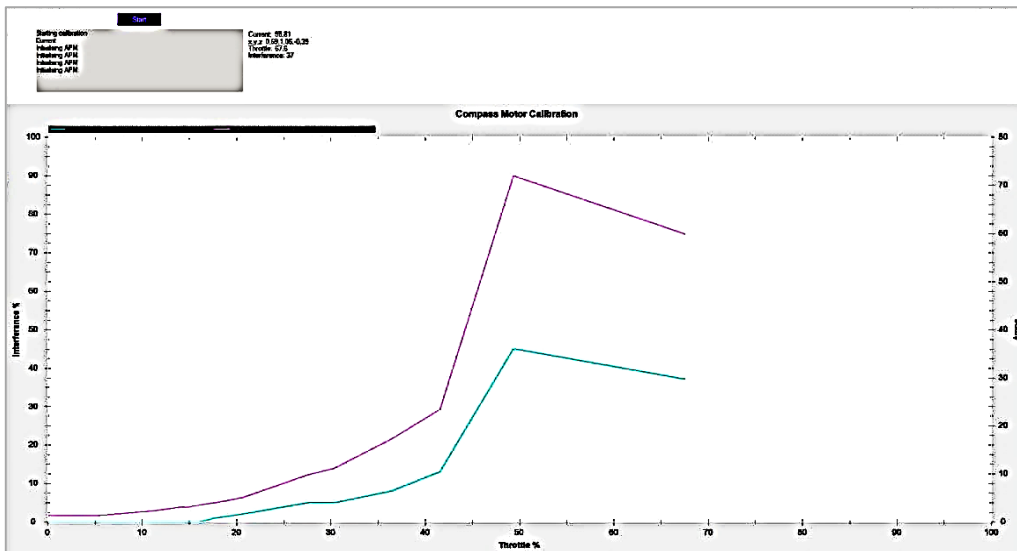


Fig. 4. Exp. № 3. Magnetometer inside the drone body, above the flight controller, shielded, grounded (screenshot from mission planner ver 1.3.75, colors inverted): blue line – interference, pink – current

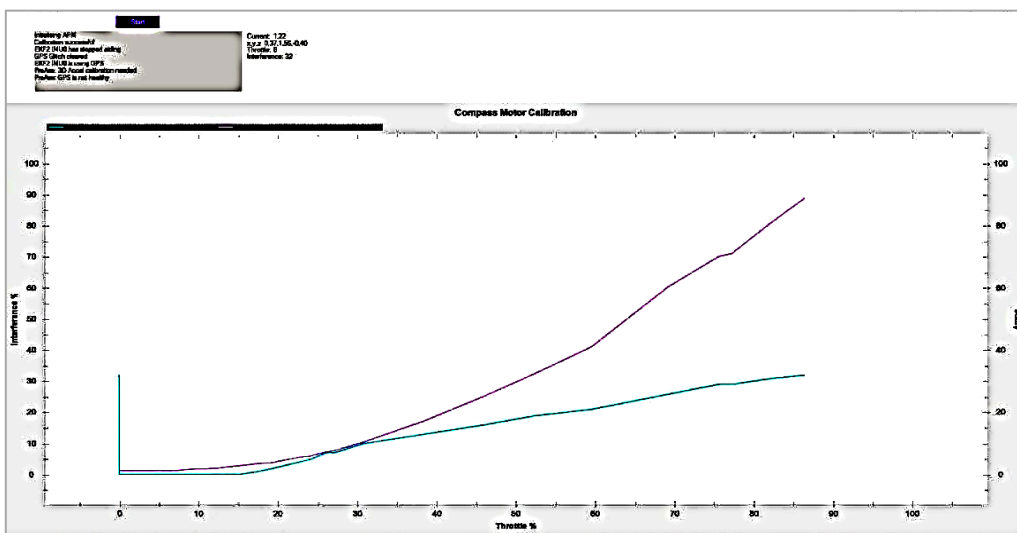


Fig. 5. Exp. № 4. Magnetometer inside the drone body, above the flight controller, shielded, grounded shield, reduced engine startup power factor from 0.5 to 0.1 (screenshot from mission planner ver 1.3.75, inverted colors): blue line – interference, pink – current

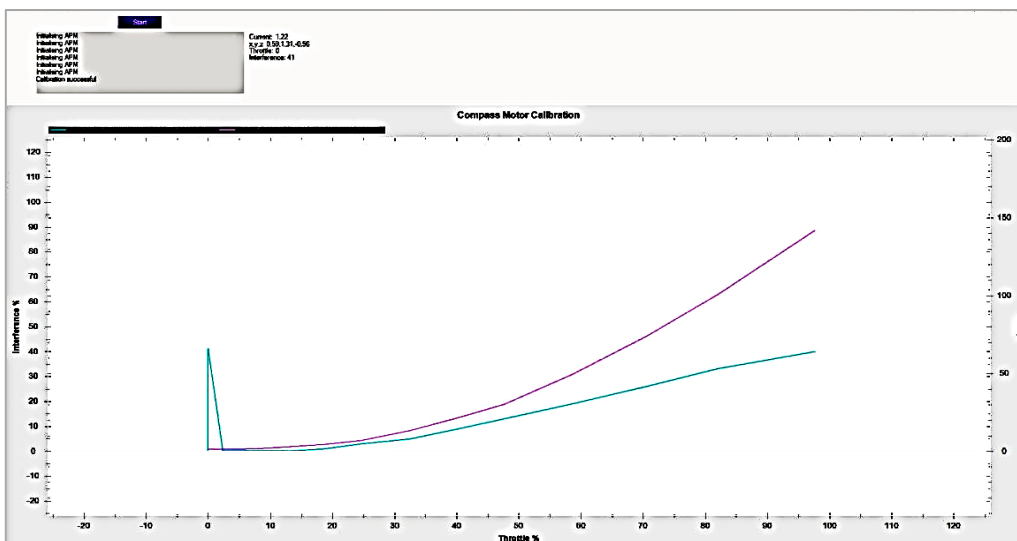


Fig. 6. Exp. № 5. Magnetometer inside the drone body, above the flight controller, shielded, grounded shield, startup power factor 0.2 (screenshot from mission planner ver 1.3.75, inverted colors): blue line – interference, pink – current

Note that the startup power factor adjusts how quickly the speed controller responds to rapid changes in gas supply [12]. Shielding of the magnetometer was performed using a plate of foil fiberglass with a thin copper layer. The GPS + magnetometer module itself was located above the flight controller in the drone body.

The results of experiment №4 (Fig. 5) were as follows: the maximum guidance is 32%, and the maximum current is 88A.

Although the lowest interference values were achieved amongst all the experiments, it should be noted that with this value of the coefficient, the good result for the interference was achieved, but the smaller the value of this factor, the worse the dynamics of the engines is, so the optimum between this parameter and the magnitude of the interference should be searched. In Fig. 6 the results of experiment №5 are shown, where the startup power factor is set to 0.2, the value of the interference has increased slightly, but is practically no worse than when the magnetometer is removed from the body. Experimental results here are as follows: the maximum guidance is 41%, and the maximum current is 149A.

### Conclusions

The role of the drone magnetometer during the monitoring of ground objects has been studied. The research has shown that copters that monitor ground objects and are not controlled by the operator but follow the pre-defined route, must be equipped with a magnetometer and GPS. The magnetometer is the most sensitive to the interference sensor. If it does not work correctly, the entire drone

navigation system stops working.

We carried out experimental studies on the influence of quadcopter design and settings on the quality of its magnetometer, and hence the copter as a whole. Most often, the magnetometer is placed in a separate module together with the GPS, which is placed outside the drone body and located on a special stand behind the body rack or top cover of the body. As a result of such placement the probability of damage or loss of the magnetometer as a result of physical breakdowns increases as well as complexity of a quadcopter design. In this paper it is proposed to place a magnetometer inside the drone body, which will increase its physical safety and simplify the design of the drone. It has been tested whether the magnetometer can be protected when placed inside the drone body from grounding from the power cable, shielding from the main electronics and changing the starting settings of the helicopter, namely by changing the value of the startup power factor of the motors.

The results of the experiments showed that to protect the magnetometer from the interference if it is placed inside the drone body, it is necessary to combine shielding of the magnetometer and decreasing of the startup power factor of the motors. Moreover, the reduction of the startup power factor of the engines from 0.5 to 0.1 for the drone used in the experiment gave the greatest effect. And the optimal result for the balance between the amount of guidance and the quality of the dynamics of the engines was the value of startup power factor of the engines equals 0.2, for the drone used in the experiment.

### REFERENCES

- (2021), *Advanced Compass Setup*, available at: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-compass-setup-advanced.html?highlight>
- Shtaev, D.V. (2019), "Analysis of control technology for unmanned aerial vehicles", *Territory of new opportunities*, №2, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-tehnologii-upravleniya-bespilotnymi-letatelnyimi-apparatami> (in Russian)
- (2021), *DIY drone: Flight controller*, available at: <https://www.djmsk.ru/guides/2018/05/25/drone-crash/> (in Russian)
- (2018), *Top 10 reasons for a drop of a quadcopters*, Website of the Company "DJI Authorized Retail Store", DJI Buyer's guide, available at: <https://www.djmsk.ru/guides/2018/05/25/drone-crash/> (in Russian)
- (2020), *Industrial Monitoring: Drone to Help!*, Website of the Company "DRONARIUM", aerial filming and drone services, available at: <https://www.dronarium.com.ua/uslugi/promyshlennyj-monitoring/> (in Russian)
- Minin, I.V. (2015), "Anti-fire monitoring of petrochemical facilities with small autonomous unmanned aerial vehicles", *Fundamental research*. № 10-3. C. 503-506, available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39245> (in Russian)
- Agarwal A., Shukla V., Singh R., Gehlot A. and Garg V. (2018), "Design and Development of Air and Water Pollution Quality Monitoring Using IoT and Quadcopter", In: Singh R., Choudhury S., Gehlot A. (eds) *Intelligent Comm., Control and Devices, Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 624, Springer, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-5903-2\\_49](https://doi.org/10.1007/978-981-10-5903-2_49)
- (2019), *Unmanned aerial vehicles in agriculture*, Website of the Company "GEOMIR", Modern technologies for agribusiness, available at: <https://www.geomir.ru/publikatsii/bespilotniki-v-selskom-khozyaystve/> (in Russian)
- Duggal, V., Sukhwani, M., Bipin, K., Reddy, G.S. and Krishna, K.M. (2016), "Plantation monitoring and yield estimation using autonomous quadcopter for precision agriculture", *IEEE Int. Conf. ICRA*, pp. 5121-5127, doi: [10.1109/ICRA.2016.7487716](https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487716)
- Zubarev, Ju.N., Fomin, D.S., Chashhin, A.N. and Zabolotnova, M.V. (2019), "The use of unmanned aerial vehicles in agriculture", *Bulletin of the Perm Federal Research Center*, №2, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-v-selskom-hozyaystve> (in Russian)
- (2021), *Mission Planner Home*, ArduPilot Documentation, available at: <https://ardupilot.org/planner/index.html>
- (2017), *How to configure your BLHeli ESCs*, available at: <https://www.propwashed.com/configure-blheli-escs/>

Received (Надійшла) 22.09.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 03.11.2021

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ ABOUT THE AUTHORS

**Майданик Олександр Олександрович** – магістрант кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральнотехнічний національний технічний університет, Кропивницький, Україна;  
**Oleksandr Maidanyk** – Master's student of Cybersecurity and Software Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine;  
 e-mail: [maidanyksmail@gmail.com](mailto:maidanyksmail@gmail.com); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8580-7502>.

**Мелешко Єлизавета Владиславівна** – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

**Yelyzaveta Meleshko** – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Cybersecurity and Software Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine;

e-mail: [elismeleshko@gmail.com](mailto:elismeleshko@gmail.com); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8791-0063>.

**Шимко Сергій Вікторович** – аспірант кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

**Serhii Shymko** – Postgraduate student of Cybersecurity and Software Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine;

e-mail: [shymko.sv@meta.ua](mailto:shymko.sv@meta.ua); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1132-484X>.

### Дослідження впливу конструкції та налаштувань квадрокоптера на якість його роботи при моніторингу наземних об'єктів

О. О. Майданик, Є. В. Мелешко, С. В. Шимко

**Анотація.** Предметом вивчення у статті є методи зменшення наведень на магнітометр квадрокоптера за рахунок зміни конструкції та налаштувань коптера для підвищення якості його роботи при моніторингу наземних об'єктів. Актуальність розробки визначається необхідністю підвищення фізичної безпеки квадрокоптерів при моніторингу наземних об'єктів у різних галузях виробництва, адже, магнітометр є найбільш чутливим до шумів датчиком, а його вихід з ладу призводить до падіння та втрати дрону. **Метою** є визначення оптимальної конструкції та налаштувань квадрокоптера з точки зору його фізичної безпеки та якості роботи при моніторингу наземних об'єктів у різних галузях виробництва. **Завдання:** перевірити чи можна захистити магнітометр при розміщенні його всередині корпусу дрону від завад з кабелів електроживлення заземленням, екрануванням та зміною стартових налаштувань коптера, а саме зміною значення коефіцієнту пускової потужності двигунів. **Методи досліджень:** теорія автоматичного управління, методи оптимального управління та методи проектування апаратного забезпечення. **Висновки.** Проведено дослідження ролі магнітометра дрону при моніторингу наземних об'єктів. Дослідження показало, що коптери, які здійснюють моніторинг наземних об'єктів, обов'язково повинні бути оснащені магнітометром та GPS. Магнітомер найбільш чутливий до перешкод датчик. Якщо він працює неправильно, перестає працювати вся навігаційна система дрону. Проведено експериментальні дослідження по впливу конструкції та налаштувань квадрокоптера на якість роботи його магнітометра, а одже і коптера в цілому. У даній роботі запропоновано розмістити магнітометр всередині корпусу дрона, що підвищить його фізичну безпеку та спростить конструкцію дрону, але разом з тим на нього збільшуються завади від кабелів електроживлення двигунів, тому необхідно підібрати ефективні методи захисту від таких завад. Перевірено чи можна захистити магнітометр при розміщенні його всередині корпусу дрону від завад з кабелів електроживлення заземленням, екрануванням та зміною стартових налаштувань коптера, а саме зміною значення коефіцієнту пускової потужності двигунів. Результати проведених експериментів показали, що для захисту від завад магнітометра, розміщеного всередині корпусу дрона, необхідно поєднати екранування магнітометра та зменшення коефіцієнту пускової потужності моторів.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат; дрон; квадрокоптер; магнітометр; наведення; якість роботи; моніторинг наземних об'єктів.

### Исследование влияния конструкции и настроек квадрокоптера на качество его работы при мониторинге наземных объектов

А. А. Майданик, Е. В. Мелешко, С. В. Шимко

**Аннотация.** Предметом изучения в статье являются методы уменьшения наводок на магнитометр квадрокоптера за счет изменения конструкции и настроек коптера для повышения качества его работы при мониторинге наземных объектов. Актуальность разработки определяется необходимостью повышения физической безопасности квадрокоптеров при мониторинге наземных объектов в различных отраслях производства, ведь магнитометр является наиболее чувствительным к шумам датчиком, а его выход из строя приводит к падению и потере дрона. **Целью** является определение оптимальной конструкции и настроек квадрокоптера с точки зрения его физической безопасности и качества работы при мониторинге наземных объектов в различных отраслях производства. **Задача:** проверить, можно ли защитить магнитометр при размещении его внутри корпуса дрона от наводок от кабеля электропитания заземлением экранированием и изменением стартовых настроек коптера, а именно изменением значения коэффициента пусковой мощности двигателей. **Методы исследований:** теория автоматического управления, методы оптимального управления и методы проектирования аппаратного обеспечения. **Выводы.** Проведено исследование роли магнитометра дрона при мониторинге наземных объектов. Исследование показало, что коптеры, производящие мониторинг наземных объектов, обязательно должны быть оснащены магнитометром и GPS. Магнитометр наиболее чувствительный к помехам датчик. Если работает неправильно, перестает работать вся навигационная система дрона. Проведены экспериментальные исследования по влиянию конструкции и настройкам квадрокоптера на качество работы его магнитометра, а значит и коптера в целом. В данной работе предложено разместить магнитометр внутри корпуса дрона, что повысит его физическую безопасность и упростит конструкцию дрона, но вместе с тем на него увеличиваются наводки от кабелей электропитания, поэтому необходимо подобрать эффективные методы защиты от таких наводок. Проверено можно ли защитить магнитометр при размещении его внутри корпуса дрона от наводок из кабеля электропитания заземлением, экранированием и изменением стартовых настроек коптера, а именно изменением значения коэффициента пусковой мощности двигателей. Результаты проведенных экспериментов показали, что для защиты от наводок магнитометра, размещенного внутри корпуса дрона, необходимо объединить экранирование магнитометра с уменьшением коэффициента пусковой мощности моторов.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат; дрон; квадрокоптер; магнитометр; наводки; качество работы; мониторинг наземных объектов.

Lev Raskin<sup>1</sup>, Larysa Sukhomlyn<sup>2</sup>, Dmytro Sagaidachny<sup>1</sup>, Roman Korsun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup>Kremenchuk Mikhail Ostrogradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine

## ANALYSIS OF MULTI-THREADED MARKOV SYSTEMS

**Abstract.** Known technologies for analyzing Markov systems use a well-operating mathematical apparatus based on the computational implementation of the fundamental Markov property. Herewith the resulting systems of linear algebraic equations are easily solved numerically. Moreover, when solving lots of practical problems, this numerical solution is insufficient. For instance, both in problems of structural and parametric synthesis of systems, as well as in control problems. These problems require to obtain analytical relations describing the dependences of probability values of states of the analyzed system with the numerical values of its parameters. The complexity of the analytical solution of the related systems of linear algebraic equations increases rapidly along with the increase in the system dimensionality. This very phenomenon manifests itself especially demonstratively when analyzing multi-threaded queuing systems. Accordingly, the objective of this paper is to develop an effective computational method for obtaining analytical relations that allow to analyze high-dimensional Markov systems. To analyze such systems this paper provides for a decomposition method based on the idea of phase enlargement of system states. The proposed and substantiated method allows to obtain analytical relations for calculating the distribution of Markov system states. The method can be effectively applied to solve problems of analysis and management in high-dimensional Markov systems. An example has been considered.

**Keywords:** multi-threaded queuing systems; high dimensionality; decomposition method of states enlargement.

### Introduction

The conventional technology to analyze Markov systems provides for calculating the limit vector of probabilities of system states [1-5] using a formula

$$\pi = \pi W, \tag{1}$$

$\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$  – is the vector of probabilities of states,  $W = (P_{ij})$  – is a matrix of probabilities of transition to the variety of possible states,  $d_{im}w = n \cdot n$ .

Computational complexity of solving systems of linear algebraic equations (1) in conjunction with the normalization condition

$$\sum_{i=1}^n \pi_i \tag{2}$$

grows rapidly along with an increase in problem dimensionality [6, 7]. Herewith one should note that when solving lots of practical problems, their numerical solution will be insufficient. Problems of economics, reliability theory, structural and parametric synthesis of systems, management theory should provide for analytical relations that determine the dependence of the probability distribution of system states on the numerical values of their parameters [8-10]. The issue of obtaining such relations is particularly significant for the problems of analyzing multi-threaded systems. The conventional approach to its solution is to use the technology of enlarging states of the related Markov chain [12, 13].

### Analyzing known results

The decomposition problem arising from states enlargement is implemented as follows. The entire set of possible system states is divided into subsets. At each iteration of solving problems, one of the subsets is allocated, but the states of other subsets are enlarged. The resulting system of states is processed. Let's write the related formal relations.

The initial set of states  $E = \{1, 2, \dots, n\}$  is divided into  $m$  subsets

$$E = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}, \bigcup_{k=1}^m E_k = E, E_{k_1} \cap E_{k_2} = \emptyset. \tag{3}$$

The states of each subset are renumbered:

$$E_1 = \{i_{11}, i_{12}, \dots, i_{1n_1}\}, E_2 = \{i_{21}, i_{22}, \dots, i_{2n_2}\},$$

$$E_m = \{i_{m1}, i_{m2}, \dots, i_{mn_m}\}.$$

Let's enter the related (3) initial distribution of states

$$\pi^{(0)} = \left( \pi_{i_{11}}^{(0)}, \dots, \pi_{i_{1n_1}}^{(0)} \right), \dots, \left( \pi_{i_{m1}}^{(0)}, \dots, \pi_{i_{mn_m}}^{(0)} \right).$$

At the first iteration of the problem solving procedure let's allocate the first  $E_1$  set, and enlarge states of the remaining subsets by assigning them the related initial values of stay probabilities. Thus the resulting set of states probabilities is as follows:

$$\pi_{i_0}^{(0)} = \left( \pi_{i_{11}}^{(0)}, \pi_{i_{12}}^{(0)}, \dots, \pi_{i_{1n_1}}^{(0)} \right); \pi_{i_k}^{(0)}; k = 2, 3, \dots, m; \tag{4}$$

$$\pi_{i_k}^{(0)} = \sum_{s=1}^{n_k} \pi_{i_{ks}}^{(0)}; k = 2, 3, \dots, m.$$

To analyze the resulting system of states let's determine the transition probabilities.

The probabilities of transition from states of the allocated set to those of the same set remain equal to the original ones, that is  $P_{i_1 s_1, i_1 s_2}, (i_{s_1}, i_{s_2}) \in E_1$ .

The probability of transition from any  $i_{1s}$  state of the  $E_1$  allocated subset to any  $E_k$  enlarged state is equal to the sum of probabilities of transitions from this state to all the states of the enlarged state, that is

$$P_{i_{1s}, i_k} = \sum_{s_2=1}^{n_k} P_{i_{1s_1}, i_{ks_2}}, s_2 = 1, 2, \dots, n_k. \tag{5}$$

The probability of transition from any  $E_k$  enlarged state to any of the  $i_{1s}$  states of the  $E_1$  allocated subset is

equal to the sum of productions of probabilities of transitions from the  $E_k$  states of subsets to  $i_{1s}$  by the  $\pi_{iks}$  conditional probabilities of the system remaining in these states, that is

$$P_{ik}, i_{1s} = \sum_{s_1=1}^{n_k} P_{iks, i_{1s}} \cdot \pi_{iks_1} / \sum_{s_1=1}^{n_k} \pi_{iks_1}, s = \overline{1, n_1}. \quad (6)$$

Here the conditional probabilities of remaining in the  $E_k$  states of the subset are assumed to be equal to  $\pi_{iks_1} = 1/n_k$ .

Finally, the probability of transition from any enlarged  $E_{k_1}$  state to some enlarged is  $E_{k_2}$  state equals to the sum of probabilities of getting into  $E_{k_2}$ , each of which, in turn, is equal to the production of probabilities of transition from states  $E_{k_1}$  to  $E_{k_2}$  by the conditional probability of remaining in the proper  $E_{k_1}$  state, that is

$$P_{k_1 k_2} = \sum_{s_1=1}^{n_{k_1}} \sum_{s_2=1}^{n_{k_2}} P_{ik_1 s_1, k_2 s_2} \frac{\pi_{ik_1 s_1}}{\sum_{s_1=1}^{n_{k_1}} \pi_{ik_1 s_1}}. \quad (7)$$

The transition probabilities calculated using formulas (5)-(7) make up the  $W^{(1)}$  matrix, which is used to calculate probabilities of states within a  $\pi^{(1)} = (\pi_{i11}, \pi_{i12}, \dots, \pi_{i1n_1}; \pi_{i2}, \pi_{i3}, \dots, \pi_{im})$  set using a formula

$$\pi^{(1)} = \pi^{(1)} W^{(1)}. \quad (8)$$

At the second iteration, the states of the first subset are enlarged due to a group probability equal to the sum of probabilities obtained at the first iteration. The second subset slims down, but all subsequent subsets remain unchanged. The iteration cycle is repeated  $m$  times. As a result, the first approximation to the desired set of probabilities of system states shall be obtained. This iterative cycle of  $m$  steps must be repeated a required number of times. Stop criterion: the maximum value of the modulus of the probability differences of the same events within neighboring cycles should become less than the specified small number.

The given procedure ensures obtaining the desired probability distribution of the system states, however, the rate of its convergence is unpredictable and may be unacceptable for systems with a real number of states.

In this context, an issue of analyzing systems with a large number of possible states remains relevant, which initiates the continuation of studies.

**Study objective:** development of a decomposition analytical method for the study of multi-threaded queuing systems.

A feasible direction is the adaptation of the undoubtedly promising idea of decomposition to the design features of multi-threaded systems.

Basic material. Decomposition method for analyzing high-dimensional multi-threaded systems. Let's consider the technology of generating models of multi-threaded Markov queuing systems as applied to systems with failures.

The analysis of the simplest system, whose input receives a single customer thread, shall be carried out using a one-dimensional graph of states and transitions. Unless the intensity of the input thread is equal to  $\lambda$ , and the intensity of queuing is equal to  $\mu$ , then this graph for an  $n$ -channel system is as follows.

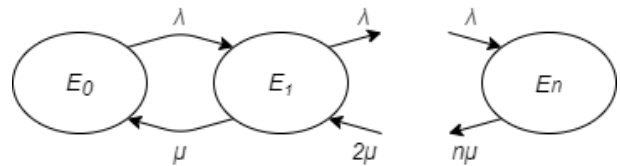


Fig. 1. A graph of states and transitions of a single-threaded system

Unless the queuing system receives two independent threads with proper values for the intensities of customer threads and their queuing  $(\lambda_1, \mu_1)$ ,  $(\lambda_2, \mu_2)$ , where the  $n_1$  channels are used for queuing the first customer thread and the  $n_2$  channels for the second one, then the related two-dimensional transition graph is as follows

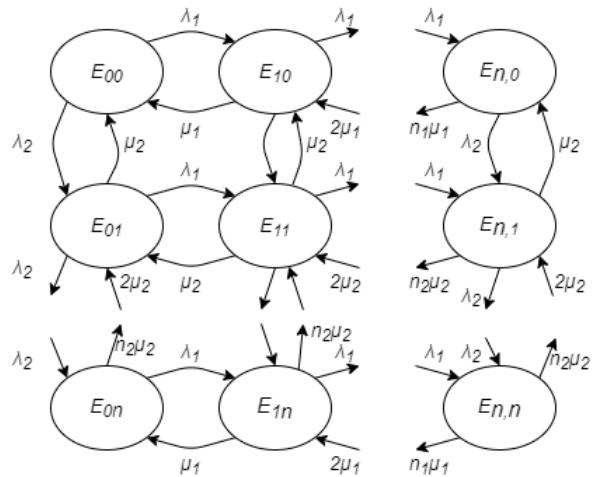


Fig. 2. A graph of states and transitions of a double-threaded system

The model of a triple-threaded queuing system with  $(\lambda_1, \mu_1, n_1)$ ,  $(\lambda_2, \mu_2, n_2)$ ,  $(\lambda_3, \mu_3, n_3)$  parameters is a three-dimensional graph given in Fig. 3.

The dimensionality of the problem to analyze multi-threaded systems is growing rapidly with an increase in the number of  $m$  threads. For an  $r$ -threaded system, the total number of its possible states  $N_r = \prod_{s=1}^R n_s$  which makes it really difficult to carry out studies.

Let's note the most important feature of the graph structure of multi-threaded queuing systems. The complete graph of a  $N$  multi-threaded dimensionality system can be naturally divided into a set of subgraphs of smaller dimensionality corresponding to different values of the number of channels engaged in customer queuing from the related threads. Herewith the subgraphs within sections for different values of the number of occupied channels of the selected thread differ from each other by these values only, which, of course, simplifies the study of the system.



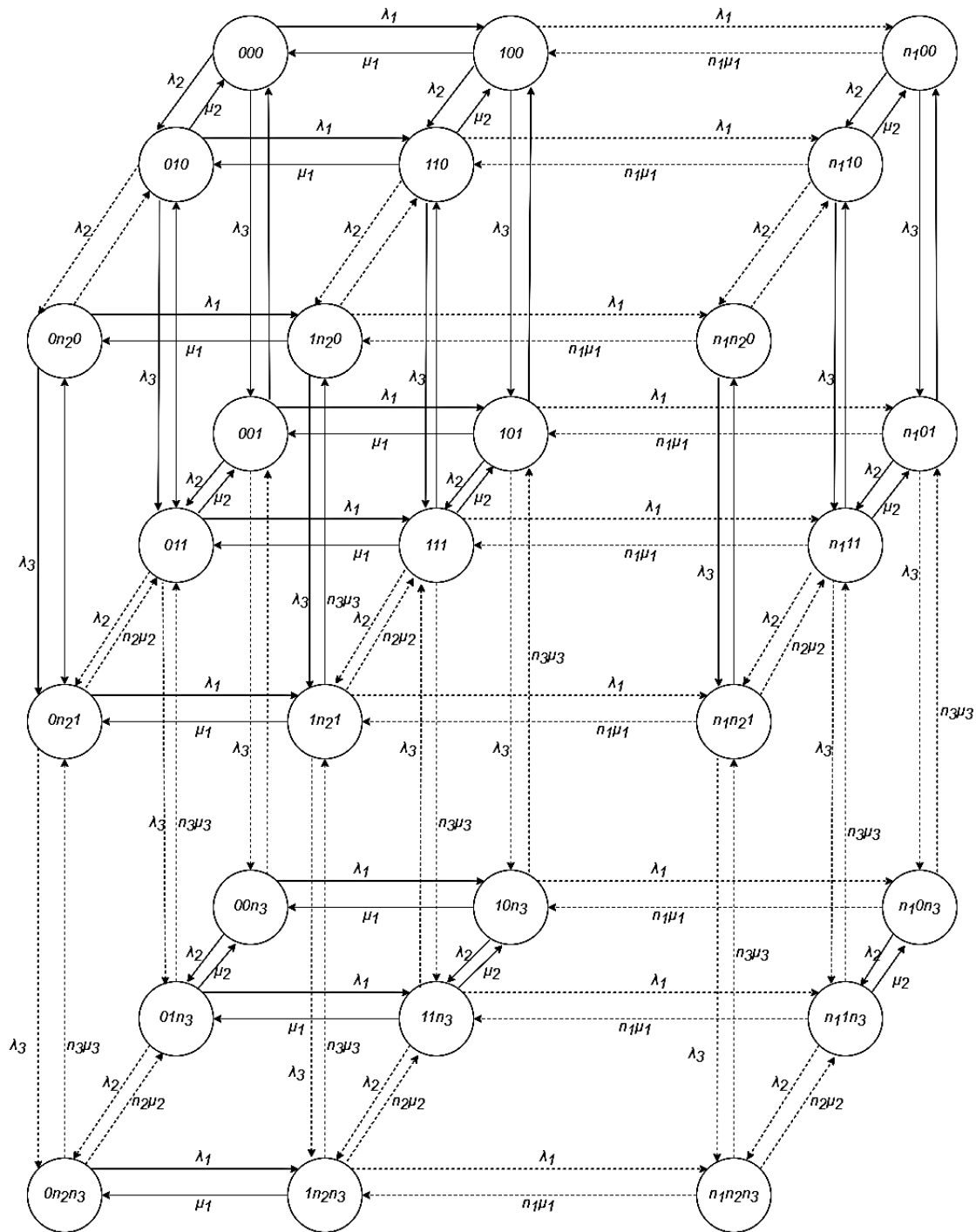


Fig. 3. A graph of states and transitions of a triple-threaded system

Let's consider the technology of analyzing high-dimensional multi-threaded systems using decomposition procedures. The following three-stage technology for solving the generated issue is proposed.

The first stage assumes that according to the general principle of decomposition, the entire set of system states should be divided into a number of subsets  $\{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ . Herewith the  $W$  transitions probability matrix is divided into the same number of submatrices  $\{W_1, W_2, \dots, W_m\}$ . Each of arising subsets should be analyzed in a standard way. As a result of solving the related problems, a set of distributions of conditional probabilities of states shall be obtained.

The second stage assumes that the probabilities of transitions between subsets should be calculated, each of which is treated as an enlarged state. The distribution of states of the initial system is calculated using the probability vector of transitions between enlarged states.

The third stage assumes that a calculation of the desired set of probabilities of the initial analyzed system states is carried out.

Let's consider the technology of applying the proposed method to a specific example. Let the triple-threaded queuing system with the two channels for each thread be analyzed.

A graph for system states and transitions is given in Fig. 4.

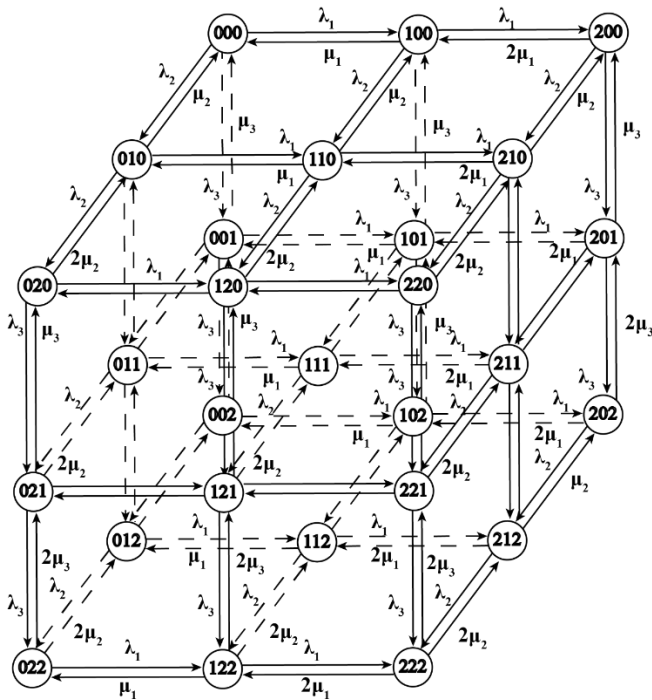


Fig. 4. Graph of states and transitions in a triple-threaded Markov system  $(\lambda_1, \mu_1, n_1), (\lambda_2, \mu_2, n_2), (\lambda_3, \mu_3, n_3)$ .

Stage 1. The entire set of states of the  $E_{initial}$  graph is divided into three  $E_0, E_1, E_2$  subsets by the number of third thread channels engaged in queuing. The related subgraphs of states and transitions are shown in Fig. 5 to Fig. 7.

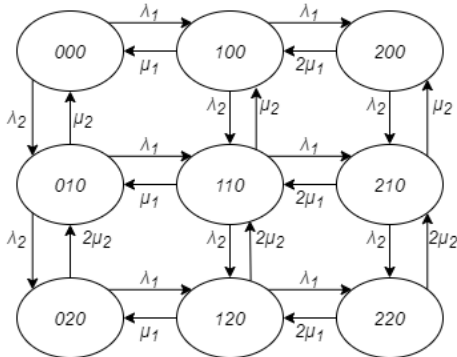


Fig. 5. A subgraph of states and transitions in a double-threaded system  $(\lambda_1, \mu_1), (\lambda_2, \mu_2)$  with a fixed number of engaged channels queuing customer of the third thread equal to zero

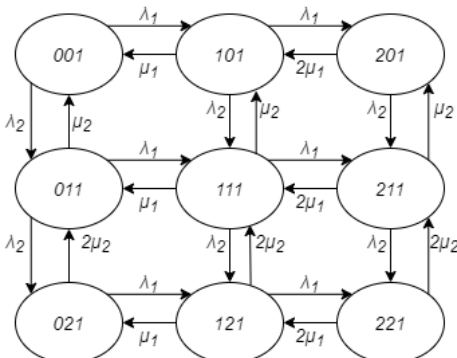


Fig. 6. A subgraph of states and transitions in a double-threaded system  $(\lambda_1, \mu_1), (\lambda_2, \mu_2)$  with a fixed number of engaged channels queuing customer of the third thread equal to figure of one

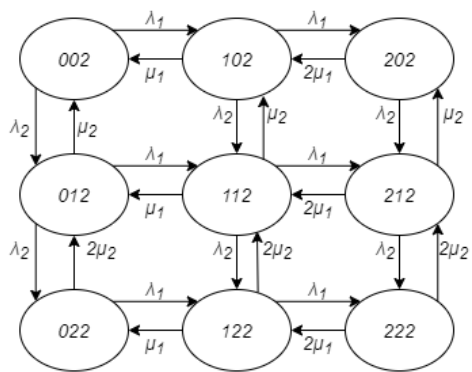


Fig. 7. A subgraph of states and transitions in a double-threaded system  $(\lambda_1, \mu_1), (\lambda_2, \mu_2)$  with a fixed number of engaged channels queuing customer of the third thread equal to figure of two

When comparing these figures, it is clear that the transition system structure in all three subgraphs is identical. Thus, to search for the distributions of states, it is enough to solve only a single analysis problem for any of the subgraphs. Let's analyze the  $E_0$  subgraph. This graph contains nine states  $\{0,0; 1,0; 2,0; 0,1; 1,1; 2,1; 0,2; 1,2; 2,2\}$ . In order to simplify the input, the third index corresponding to the number of engaged channels queuing customer of the third thread is omitted here. The related matrix of  $S_0$  transition intensities for the  $E_0$  subgraph is as follows

$$S_0 = \begin{pmatrix} 0 & \lambda_1 & 0 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_1 & 0 & \lambda_1 & 0 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu_1 & 0 & 0 & 0 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_2 & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_2 & 0 & \mu_1 & 0 & \lambda_1 & 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_2 & 0 & 2\mu_1 & 0 & 0 & 0 & \lambda_2 \\ 0 & 0 & 0 & \mu_2 & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_2 & 0 & \mu_1 & 0 & \lambda_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_2 & 0 & 2\mu_1 & 0 \end{pmatrix}$$

This matrix of transition intensities is easily transformed into a matrix of  $P=(p_{ij})$  transition probabilities, using which a system of linear algebraic equations is formed with respect to the vector of conditional probabilities of states

$$\pi_0 = (\pi_{00}, \pi_{10}, \pi_{20}; \pi_{01}, \pi_{11}, \pi_{21}; \pi_{02}, \pi_{12}, \pi_{22}).$$

This system, supplemented by the normalization condition, is as follows

$$\pi_0 = \pi_0 P, \tag{9}$$

$$\sum_{i_1=0}^2 \sum_{i_2=0}^2 \pi_{i_1 i_2} = 1.$$

The numerical solution of this system can be easily obtained. However, the analytical solution, even for the resulting simple system, requires tedious transformations. At the same time, to analyze the system described by the  $E_0$  (or  $E_1$ , or  $E_2$ ) subgraph, the ideas of decomposition can be used once again. The  $E_0$  states subset is divided into three  $E_{00}, E_{01}, E_{02}$  subsets as follows:

$$E_{00}=\{0,0;1,0;2,0\}, E_{01}=\{0,1;1,1;2,1\},$$

$$E_{02}=\{0,2;1,2;2,2\}.$$

The corresponding sub-subgraphs are of the following identical form

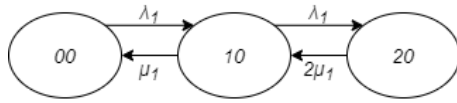


Fig. 8. A sub-subgraph of the  $E_0$  subgraph of states and transitions

A vector of  $(\hat{\pi}_{00}, \hat{\pi}_{10}, \hat{\pi}_{20})$  conditional probabilities of states is entered in the  $E_0$  sub-subgraph. Considering the structure of this sub-subgraph the components of this vector are calculated using the Erlang formula

$$\hat{\pi}_{i0} = \frac{(\lambda_1/\mu_1)^i/i!}{\sum_{i=0}^2 (\lambda_1/\mu_1)^i/i!}, i = 0, 1, 2. \quad (10)$$

It is clear that the same relations determine the distributions of states for the  $E_{01}$  and  $E_{02}$  sub-subgraphs, that is

$$\hat{\pi}_{i1} = \hat{\pi}_{i2} = \frac{(\lambda_1/\mu_1)^i/i!}{\sum_{i=0}^2 (\lambda_1/\mu_1)^i/i!}, i = 0, 1, 2. \quad (11)$$

The next step is to calculate the probabilities of transition between the  $E_{00}, E_{01}, E_{02}$  sub-subsets in accordance with the  $E_0$  subgraph structure:



Fig. 9. The  $E_0$  subgraph structure

The relations for calculating probabilities of transition are obtained using a detailed structure of the  $E_0$  subgraph (Fig. 5)

$$u_{01} = \hat{\pi}_{00}\lambda_2 + \hat{\pi}_{10}\lambda_2 + \hat{\pi}_{20}\lambda_2 = \lambda_2(\hat{\pi}_{00} + \hat{\pi}_{10} + \hat{\pi}_{20}) = \lambda_2,$$

$$u_{12} = \hat{\pi}_{01}\lambda_2 + \hat{\pi}_{11}\lambda_2 + \hat{\pi}_{21}\lambda_2 = \lambda_2(\hat{\pi}_{01} + \hat{\pi}_{11} + \hat{\pi}_{21}) = \lambda_2,$$

$$v_{10} = \hat{\pi}_{01}\mu_2 + \hat{\pi}_{11}\mu_2 + \hat{\pi}_{21}\mu_2 = \mu_2(\hat{\pi}_{01} + \hat{\pi}_{11} + \hat{\pi}_{21}) = \mu_2,$$

$$v_{21} = \hat{\pi}_{02}2\mu_2 + \hat{\pi}_{12}2\mu_2 + \hat{\pi}_{22}2\mu_2 = 2\mu_2(\hat{\pi}_{02} + \hat{\pi}_{12} + \hat{\pi}_{22}) = 2\mu_2. \quad (12)$$

Accordingly, the  $E_0$  structure, given in Fig. 9, acquires the following form available for analysis



Fig. 10. The  $E_0$  subgraph structure

The obtained (10)-(12) relations allow to calculate the distribution of the system remaining in the

states of the  $E_{00}, E_{01}, E_{02}$  subgraphs. Let's enter the corresponding  $t_0 = (t_{00}, t_{01}, t_{02})$  vector, whose components are determined using the Erlang formulas:

$$t_{0j} = \frac{(\lambda_2/\mu_2)^j/j!}{\sum_{j=0}^2 (\lambda_2/\mu_2)^j/j!}, j = 0, 1, 2. \quad (13)$$

Then the distribution of states for the  $E_0$  subgraph is as follows.

$$\pi_{00} = \hat{\pi}_{00}t_{00}; \pi_{10} = \hat{\pi}_{10}t_{00}; \pi_{20} = \hat{\pi}_{20}t_{00};$$

$$\pi_{01} = \hat{\pi}_{01}t_{01}; \pi_{11} = \hat{\pi}_{11}t_{01}; \pi_{21} = \hat{\pi}_{21}t_{01}; \quad (14)$$

$$\pi_{02} = \hat{\pi}_{02}t_{02}; \pi_{12} = \hat{\pi}_{12}t_{02}; \pi_{22} = \hat{\pi}_{22}t_{02};$$

$$\pi_{ij} = \frac{(\lambda_1/\mu_1)^j/j!}{\sum_{j=0}^2 (\lambda_1/\mu_1)^j/j!} \cdot \frac{(\lambda_2/\mu_2)^j/j!}{\sum_{j=0}^2 (\lambda_2/\mu_2)^j/j!}. \quad (15)$$

It is clear that the analysis carried out for the  $E_0$  subgraph can be repeated for  $E_1$  and  $E_2$  subgraphs as well. In addition, the same distributions as above can be obtained when calculating the probabilities of transitions between  $E_0, E_1, E_2$ . As one can easily see in Fig. 4 these distributions assume that the subgraph structure of the initial graph of states and transitions has the form given in Fig. 11.

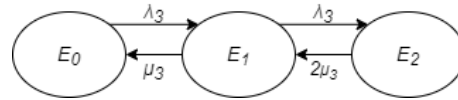


Fig. 11. The subgraph structure of the  $E$ graph of states and transitions of systems

Let's enter the  $W = (W_0, W_1, W_2)$  vector of probabilities of the system remaining within  $E_0, E_1, E_2$  subsets. As before, the components of this vector are determined using the Erlang formulas:

$$W_k = \frac{(\lambda_3/\mu_3)^k/k!}{\sum_{k=0}^2 (\lambda_3/\mu_3)^k/k!}, k = 0, 1, 2. \quad (16)$$

Now, considering remarks from above and based on (15), (16) let's write the final relations determining the distribution of states of the analyzed triple-threaded Markov system having two queuing channels for each thread.

This distribution is as follows:

$$\pi_{ijk} = \left( \frac{(\lambda_1/\mu_1)^i/i!}{\sum_{i=0}^2 (\lambda_1/\mu_1)^i/i!} \right) \times \left( \frac{(\lambda_2/\mu_2)^j/j!}{\sum_{j=0}^2 (\lambda_2/\mu_2)^j/j!} \right) \left( \frac{(\lambda_3/\mu_3)^k/k!}{\sum_{k=0}^2 (\lambda_3/\mu_3)^k/k!} \right), \quad (17)$$

$$i = 0, 1, 2; j = 0, 1, 2; k = 0, 1, 2.$$

The problem is solved.

It is clear that the proposed technique easily applies to the case of analyzing a queuing system, the input of which receives a superposition of  $m$  threads with  $(\lambda_i, \mu_i), i = 1, 2, \dots, m$  parameters. Customer entering

input are queued by a system that has  $n_i$  channels for the related  $i$ -th thread  $I = 1, 2, \dots, m$ . Let's enter a vector  $(i_1, i_2, \dots, i_m)$ , the  $i_s$  component of which determines the number of channels engaged in customer queuing of the  $s$ -th thread,  $s = 1, 2, \dots, m$ .

Then, similar to (17), the distribution of states of the system is determined by the following relations:

$$\pi_{i_1 i_2 \dots i_m} = \frac{(\lambda_1 / \mu_1)^{i_1} / i_1!}{\sum_{i_1=0}^2 (\lambda_1 / \mu_1)^{i_1} / i_1!} \times \left( \frac{(\lambda_2 / \mu_2)^{i_2} / i_2!}{\sum_{i_2=0}^2 (\lambda_2 / \mu_2)^{i_2} / i_2!} \right) \dots \left( \frac{(\lambda_m / \mu_m)^{i_m} / i_m!}{\sum_{i_m=0}^2 (\lambda_m / \mu_m)^{i_m} / i_m!} \right) = (18)$$

$$= \prod_{s=1}^m \left( \frac{(\lambda_s / \mu_{s1})^{i_s} / i_s!}{\sum_{i_s=0}^2 (\lambda_s / \mu_{s1})^{i_s} / i_s!} \right).$$

The relative simplicity of the result obtained is due to the use of a rather hard limiting: a number of channels for customer queuing of each thread is fixed. The removal of this customer, which shall occur unless each channel is adapted to customer queuing from any thread, complicates the situation to some extent.

Let's consider a method for solving the problem arising in this case on a concrete example of analyzing a double-threaded system with  $(\lambda_1, \mu_1)$ ,  $(\lambda_2, \mu_2)$  parameters and a total number of  $n$  queuing channels. Such graph of states and transitions is given in Fig. 12.

Under the given decomposition technology, let's divide the entire set of states into  $E_0, E_1, \dots, E_k, \dots, E_{n-1}, E_n$  subsets by the number of channels engaged in customer queuing of the second thread.

The related graph of states and transitions is given in Fig. 13.

Let's calculate the conditional distribution of states for each of the  $E_0, E_1, \dots, E_n$  subsets using the Erlang formulas.

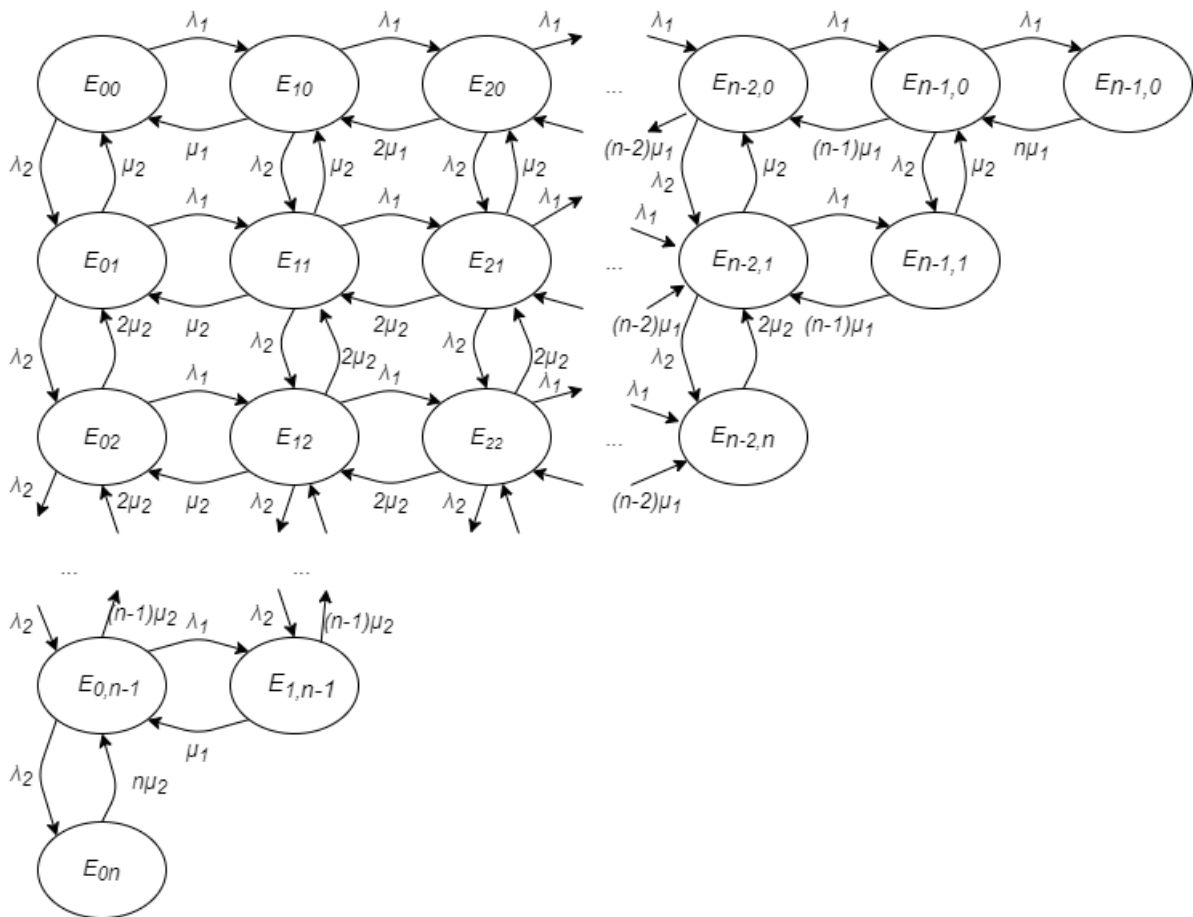


Fig. 12. A graph of states and transitions of a double-threaded system with  $n$  queuing channels

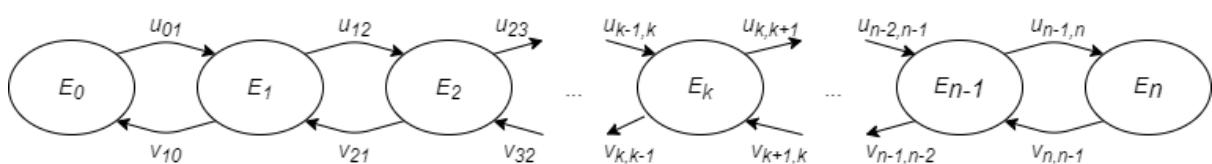


Fig. 13. A graph of states and transitions for a grouped set of states

The conditional distribution of states for  $E_0$  is as follows.

$$\hat{\pi}_{i0} = \frac{(\lambda_1/\mu_1)^i/i!}{\sum_{i=0}^n (\lambda_1/\mu_1)^i/i!}, i = 0, 1, 2, \dots, n. \quad (19)$$

The conditional distribution of states for  $E_1$ :

$$\hat{\pi}_{i1} = \frac{(\lambda_1/\mu_1)^i/i!}{\sum_{i=0}^{n-1} (\lambda_1/\mu_1)^i/i!}, i = 0, 1, 2, \dots, n-1. \quad (20)$$

The conditional distribution of states for  $E_k$ :

$$\hat{\pi}_{ik} = \frac{(\lambda_1/\mu_1)^i/i!}{\sum_{i=0}^{n-k} (\lambda_1/\mu_1)^i/i!}, i = 0, 1, 2, \dots, n-k. \quad (21)$$

The conditional distribution of states for  $E_{n-1}$ :

$$\hat{\pi}_{in-1} = \frac{(\lambda_1/\mu_1)^i/i!}{\sum_{i=0}^1 (\lambda_1/\mu_1)^i/i!} = \frac{(\lambda_1/\mu_1)^i/i!}{1 + \lambda_1/\mu_1}, i = 0, 1. \quad (22)$$

The conditional distribution of states for  $E_0$ :

$$\hat{\pi}_{in} = 1. \quad (23)$$

Now let's calculate a set of transition probabilities between subsets:

$$u_{01} = \hat{\pi}_{00}\lambda_2 + \hat{\pi}_{10}\lambda_2 + \dots + \hat{\pi}_{n-1,0}\lambda_2 = \lambda_2 \sum_{i=0}^{n-1} \hat{\pi}_{i0}, \quad (24)$$

$$v_{10} = \hat{\pi}_{01}\mu_2 + \hat{\pi}_{11}\mu_2 + \dots + \hat{\pi}_{n-1,1}\mu_2 = \mu_2 \sum_{i=0}^{n-1} \hat{\pi}_{i1},$$

$$u_{12} = \hat{\pi}_{01}\lambda_2 + \hat{\pi}_{11}\lambda_2 + \dots + \hat{\pi}_{n-1,2}\lambda_2 = \lambda_2 \sum_{i=0}^{n-2} \hat{\pi}_{i2},$$

$$v_{21} = \hat{\pi}_{02}2\mu_2 + \hat{\pi}_{12}2\mu_2 + \dots + \hat{\pi}_{n-1,2}2\mu_2 = 2\mu_2 \sum_{i=0}^{n-2} \hat{\pi}_{i2},$$

...

$$u_{k-1,k} = \hat{\pi}_{0k-1}\lambda_2 + \hat{\pi}_{1k-1}\lambda_2 + \dots + \hat{\pi}_{n-k+1,k-1}\lambda_2 = \lambda_2 \sum_{i=0}^{n-k+1} \hat{\pi}_{ik-1},$$

$$v_{k,k-1} = \hat{\pi}_{0k}k\mu_2 + \hat{\pi}_{1k}k\mu_2 + \dots + \hat{\pi}_{n-k,k}k\mu_2 = k\mu_2 \sum_{i=0}^{n-k} \hat{\pi}_{ik},$$

$$u_{n-1,n} = \hat{\pi}_{0n-1}\lambda_2 + \hat{\pi}_{1n-1}\lambda_2 + \dots + \hat{\pi}_{n-1,2}\lambda_2 = \lambda_2 \sum_{i=0}^{n-2} \hat{\pi}_{in-1},$$

$$v_{n,n-1} = \hat{\pi}_{0n}n\mu_2.$$

The resulting set of transition probabilities between subsets of states allows to find out the distribution of related probabilities.

Let's make up a system of Kolmogorov equations with respect to the  $P_0, P_1, \dots, P_n$  probabilities of the system remaining within  $E_0, E_1, E_2, \dots, E_n$  subsets, we have

$$\begin{aligned} -u_{01}P_0 + v_{10}P_1 &= 0, \\ u_{01}P_0 + v_{21}P_2 - P_1(u_{12} + v_{10}) &= 0, \\ u_{12}P_1 + v_{32}P_3 - P_2(u_{23} + v_{21}) &= 0, \\ u_{k-1,k}P_{k-1} + v_{k+1,k}P_{k+1} - & \\ -P_k(u_{k,k+1} + v_{k,k-1}) &= 0, \\ \dots & \\ u_{n-2,n-1}P_{n-2} + v_{n,n-1}P_n - & \\ -P_{n-1}(u_{n-1,n} + v_{n-1,n-2}) &= 0, \\ u_{n-1,n}P_{n-1} + v_{n,n-1}P_n &= 0. \end{aligned} \quad (25)$$

In order to simplify the analytical description of the system of algebraic equations (25), let's enter additional variables

$$y_k = u_{k-1,k}P_{k-1} - v_{k,k-1}P_k, k = 1, 2, \dots, n. \quad (26)$$

By substituting (26) into (25), we obtain

$$\begin{aligned} y_1 &= 0, \\ y_1 - y_2 &= 0, \\ y_2 - y_3 &= 0, \\ \dots & \\ y_k - y_{k+1} &= 0, \\ \dots & \\ y_{n-1} - y_n &= 0, \\ y_n &= 0. \end{aligned} \quad (27)$$

Therefore

$$y_1 = y_2 = \dots = y_k = \dots = y_n = 0.$$

Thus

$$y_k = u_{k-1,k}P_{k-1} - v_{k,k-1}P_k = 0. \quad (28)$$

Equation (28) sets the recurrence relation

$$P_k = \frac{u_{k-1,k}}{v_{k,k-1}} P_{k-1}, k = 1, 2, \dots, n. \quad (29)$$

Therefore we obtain

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{u_{01}}{v_{10}} P_0, \\ P_2 &= \frac{u_{12}}{v_{21}} P_1, \\ \dots & \\ P_k &= \frac{u_{k-1,k}}{v_{k,k-1}} P_{k-1}, \\ \dots & \\ P_n &= \frac{u_{n-1,n}}{v_{n,n-1}} P_{n-1}. \end{aligned} \quad (30)$$

Using a sequential system of substitutions of the subsequent relation from (30) to the previous one, let's express all the probabilities obtained by means of  $P_0$ . We have

$$\begin{aligned}
 P_2 &= \frac{u_{12}u_{01}}{v_{10}v_{21}} P_0 = \frac{\prod_{s=1}^2 u_{s-1,s}}{\prod_{s=1}^2 v_{s,s-1}}, \\
 &\dots \\
 P_k &= \frac{u_{01}u_{12} \dots u_{k-1,k}}{v_{10}v_{21} \dots v_{k,k-1}} P_0 = \\
 &= \frac{\prod_{s=1}^k u_{s-1,s}}{\prod_{s=1}^k v_{s,s-1}} P_0, \quad k = 1, 2, \dots, n. \\
 &\dots \\
 P_n &= \frac{\prod_{s=1}^n u_{s-1,s}}{\prod_{s=1}^n v_{s,s-1}} P_0.
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

To search for  $P_0$ , we use the normalization condition:

$$\sum_{k=0}^n P_k = \left( 1 + \sum_{k=1}^n \frac{\prod_{s=1}^k u_{s-1,s}}{\prod_{s=1}^k v_{s,s-1}} \right) P_0 = 1.$$

Therefore

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^n \frac{\prod_{s=1}^k u_{s-1,s}}{\prod_{s=1}^k v_{s,s-1}}}.$$

Then

$$P_k = \frac{\prod_{s=1}^k u_{s-1,s}}{\prod_{s=1}^k v_{s,s-1} \left( 1 + \sum_{k=1}^n \frac{\prod_{s=1}^k u_{s-1,s}}{\prod_{s=1}^k v_{s,s-1}} \right)}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, n. \tag{32}$$

Now, combining the (19)-(22), (24), (32) relations, let's write the unconditional probability of the  $E_{ik}$  state

$$\begin{aligned}
 \pi_{ik} &= \frac{\left( \frac{\lambda_1}{\mu_1} \right)^i / i!}{\sum_{i=0}^{n-k} \left( \frac{\lambda_1}{\mu_1} \right)^i / i!} \times \\
 &\frac{\prod_{s=1}^k u_{s-1,s}}{\prod_{s=1}^k v_{s,s-1}} \left( 1 + \sum_{k=1}^n \frac{\prod_{s=1}^k u_{s-1,s}}{\prod_{s=1}^k v_{s,s-1}} \right), \\
 &i = 0, 1, 2, \dots, n; k = 0, 1, 2, \dots, n; i + k \leq n.
 \end{aligned}$$

The problem solution is completed.

The principal advantage of the proposed method of analyzing high-dimensional systems is to reduce the solutions of initially complex problems to a sequence of significantly simpler ones. Herewith, the method ensures an accurate solution of the problem. The further studies direction: spreading the proposed approach for the analysis of multi-threaded systems with thread priorities, whose relative importance is estimated by the pair-wise comparison method [14].

### Conclusions

1. A method of analytical solution of the problem of analyzing high-dimensional Markov systems has been proposed. The computational pattern of the method implements the decomposition of the initial problem to a set of significantly simpler problems, the analytical solution of which is possible.

2. The principal advantage of the method is that the proposed technology can be established hierarchically. Herewith, the enlarged sets of states obtained following the first stage of the hierarchy can be divided into sub-subsets once again, unless required by their dimensionality.

### REFERENCES

1. Volkova, V.N. and Denisov, A.A. (2006), *Theory of systems*, Higher School, Moscow, 511 p.
2. Boruga-Reed, A.T. (1969), *Elements of the theory of Markov processes and their applications*, Science, Moscow, 382 p.
3. Kemeny, J. and Snell, J. (1970), *Finite Markov chains*, Science, 264 p.
4. Schmidt, A.V. and Churyukin, V.A. (2015), "Markov models of economic systems", *SU Bulletin*, vol. 9, no. 3, pp. 100-105.
5. Ventetsl, E.S. and Ovcharov, L.A. (2000), *Probability theory and its engineering-related applications*, Higher School, Moscow, 318 p.
6. Ilyin, V.A. and Poznyak, E.G. (2004), *Linear algebra*, Physmathlit, Moscow, 280 p.
7. Verzhbitsky, V.M. (2009), *Fundamentals of numerical methods*, Higher School, Moscow, 840 p.
8. Sokolov, G.A. (2005), *Probability theory. Controlled Markov chains in economics*, Physmathlit, Moscow, 248 p.
9. Pugachev, V.S. (1962), *Random functions theory and its application to automatic control problems*, GIFML, Moscow, 384 p.
10. Timoshenkov, S.P. (2013), *Fundamentals of reliability theory*, MIET, Moscow, 284 p.
11. Kurenkov, V.I., Volotsuev V.I. (2010), "Reliability of products and systems of rocket and space technology", Samara, 212 p.
12. Karpenko, V.V., and Yamen, Khazim (2016), "Decomposition technology of analyzing systems with a large number of states", *Zb. Science. Papers of AFKNU*, Vol. 2(17), pp. 97-99.
13. Raskin, L.G. (1997), "Markov chains analysis using phase enlargement of states", *Science, technology, equipment, education, health*, NTU KhPI, p. 28.
14. Raskin, L.G. and Seraya, O.V. (2003), "Formation of a scalar preference criterion based on the results of pair-wise comparisons", *Bulletin of NTU KhPI*, No. 6, pp. 63-68.

Received (Надійшла) 15.10.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.11.2021

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Раскін Лев Григорович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

**Lev Raskin** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Distributed Information Systems and Cloud Technologies, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [topology@ukr.net](mailto:topology@ukr.net); ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9015-4016>.

**Сухомлин Лариса Вадимівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри менеджменту, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна;

**Larysa Sukhomlyn** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management, Kremenchuk Mikhail Ostrogradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine;  
e-mail: [lar.sukhomlyn@gmail.com](mailto:lar.sukhomlyn@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9511-5932>.

**Сагайдачний Дмитро Олексійович** – кандидат технічних наук, старший викладач, професор кафедри розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, Україна;

**Dmytro Sagaidachny** – Candidate of Technical Sciences, senior lecturer, Professor of the Department of Distributed Information Systems and Cloud Technologies, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [d.sagaidachny@gmail.com](mailto:d.sagaidachny@gmail.com); ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6901-6770>.

**Корсун Роман Олегович** – аспірант кафедри розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

**Roman Korsun** – postgraduate student of the Department of Information Systems and Technologies, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [roman.korsun7@gmail.com](mailto:roman.korsun7@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1950-4263>.

**Аналіз багатопотокових марківських систем**

Л. Г. Раскін, Л. В. Сухомлин, Д. О. Сагайдачний, Р. О. Корсун

**Анотація.** Відомі технології аналізу марківських систем використовують добре працюючий математичний апарат, що спирається на обчислювальну реалізацію основної марківської властивості. Виникаючи при цьому системи лінійних алгебраїчних рівнянь легко вирішуються чисельно. Разом з тим, при вирішенні багатьох практичних завдань цього чисельного рішення недостатньо. Наприклад, у задачах структурного та параметричного синтезу систем, а також у завданнях управління. У цих завданнях необхідно отримати аналітичні співвідношення, що описують залежність значень ймовірностей станів аналізованої системи з чисельними значеннями її параметрів. Складність аналітичного розв'язання відповідних систем лінійних алгебраїчних рівнянь швидко зростає зі збільшенням розмірності системи. Саме цей феномен проявляється особливо демонстративно під час аналізу багатопотокових систем масового обслуговування. Відповідно до цього мета роботи – розробка ефективного обчислювального методу отримання аналітичних співвідношень, які забезпечують можливість аналізу марківських систем високої розмірності. У роботі для аналізу таких систем розроблено декомпозиційний метод, заснований на ідеї фазового укрупнення станів системи. Запропонований та обґрунтований метод дозволяє отримати аналітичні співвідношення для розрахунку розподілу ймовірностей станів марківських систем. Метод може бути ефективно застосований для вирішення завдань аналізу та управління в марківських системах високої розмірності. Розглянуто приклад.

**Ключові слова:** багатопотокові системи обслуговування; висока розмірність; декомпозиційний метод укрупнення станів.

**АНАЛИЗ МНОГОПОТОКОВЫХ МАРКОВСКИХ СИСТЕМ**

Л. Г. Раскин, Л. В. Сухомлин, Д. О. Сагайдачный, Р. О. Корсун

**Аннотация.** Известные технологии анализа марковских систем используют хорошо работающий математический аппарат, опирающийся на вычислительную реализацию основополагающего марковского свойства. Возникающие при этом системы линейных алгебраических уравнений легко решаются численно. Вместе с тем, при решении очень многих практических задач этого численного решения недостаточно. Например, в задачах структурного и параметрического синтеза систем, а также в задачах управления. В этих задачах необходимо получить аналитические соотношения, описывающие зависимости значений вероятностей состояний анализируемой системы с численными значениями её параметров. Сложность аналитического решения соответствующих систем линейных алгебраических уравнений быстро растет с увеличением размерности системы. Именно этот феномен проявляется в особенности демонстративно при анализе многопоточковых систем массового обслуживания. В соответствии с этим цель работы – разработка эффективного вычислительного метода получения аналитических соотношений, обеспечивающих возможность анализа марковских систем высокой размерности. В работе для анализа таких систем разработан декомпозиционный метод, основанный на идее фазового укрупнения состояний системы. Предложенный и обоснованный метод позволяет получить аналитические соотношения для расчета распределения вероятностей состояний марковских систем. Метод может быть эффективно применен для решения задач анализа и управления в марковских системах высокой размерности. Рассмотрен пример.

**Ключевые слова:** многопоточковые системы обслуживания; высокая размерность; декомпозиционный метод укрупнения состояний.

Т. В. Смірнова, К. О. Буравченко, С. С. Кравченко, В. О. Горбов, О. А. Смірнов

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

## ХМАРНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ПОВЕРХОНЬ КОНСТРУКЦІЙ І ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**Анотація.** Об'єктом дослідження є процес підтримки прийняття рішень технологічного процесу. Предметом дослідження є система підтримки прийняття рішень технологічного процесу відновлення поверхонь конструкцій і деталей машин у вигляді хмарного сервісу. Мета роботи полягає в розробці системи підтримки прийняття рішень технологічного процесу відновлення поверхонь конструкцій і деталей машин у вигляді хмарного сервісу, що дозволить у подальшому оптимізувати високотехнологічні процеси підприємств різного масштабу з використанням хмарних інформаційних технологій. У результаті дослідження проаналізовано труднощі автоматизації проектування технологічних процесів, пов'язані головним чином з тим, що завдання проектування технологічних процесів не мають в даний час формальних методів вирішення. Тому для здійснення технологічного проектування проведено розробку формалізації технології (або її частини), тобто проведено заміну (перетворення) змістовних пропозицій математичним апаратом. В результаті даної формалізації запропоновано схему руху інформації в процесі оптимізації технологічного процесу. розроблено модель реалізації структури технологічного процесу, для якої визначено основні вхідні параметри: перелік параметрів, які впливають на процес. Також була запропонована структура експертної системи для оптимізації технологічних процесів, проаналізовані методи представлення знань та відповідно розроблено схему потоків інформації під час реалізації даної експертної системи. На основі розглянутих та розроблених методів та механізмів, які використовують для розробки технологічних процесів розроблено структуру інформаційної хмарної системи підтримки прийняття рішень для автоматизації створення оптимізованих технологічних процесів. За допомогою використання розроблених методів та моделей, в результаті проведення процесу оптимізації технологічного процесу за допустимими евристичними правилами, вдалося отримати множини ланцюгів окремо оптимізованих технологічних процесів, з якої проводиться багатокритеріальний відбір, що відповідає поставленим вимогам оптимізації. Користувач системи може отримувати у відповідь як і одну картку технологічного процесу, так і декілька найкращих. **Висновки.** Розроблені підходи оптимізації технологічних процесів були застосовані до вирішення задачі оптимізації технологічного процесу електродугової обробки. Спочатку проведено формалізацію технологічного процесу електродугової обробки. Після цього, проведено формування евристичних правил та бази знань структури технологічного процесу електродугового напилення та відповідно розроблено структури бази знань даного технологічного процесу та діаграма використання розробленої інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу.

**Ключові слова:** система підтримки прийняття рішень; технологічні процеси; хмарні сервіси.

### Вступ

Сучасні високотехнологічні підприємства можуть сягати дуже великих розмірів, а і відповідно технологічні процеси, які на них забезпечуються, можуть мати дуже складні розгалужені структури. В залежності від типу виробництва, наявної інфраструктури, використовуваних методів тощо комплексний опис, реалізація та моніторинг технологічних процесів може бути дуже складною задачею, для вирішення якої необхідно застосовувати різноманітні методи дослідження. Зважаючи на це, можна виділити дуже перспективний напрям щодо оптимізації високотехнологічних процесів, а саме використання хмарних інформаційних технологій для оптимізації виробничих процесів підприємств різного масштабу. Проте все одно залишається ряд невирішених проблем під час використання хмарних технологій для оптимізації виробничих процесів, що пов'язані із формалізацією самих виробничих процесів, вибором методів оптимізації, моніторингом всіх процесів, захистом даних щодо виробничих процесів тощо.

Тому метою даної роботи є розробка моделі системи підтримки технологічних процесів з використанням хмарних технологій.

Для досягнення поставленої мети в даній роботі вирішувались такі задачі:

1. Формалізація узагальненої проблеми підтримки технологічних процесів.

2. Удосконалення моделі реалізації структури технологічного процесу.

3. Удосконалення структурної моделі інформаційної хмарної системи підтримки технологічних процесів.

4. Побудова структурної хмарної системи підтримки прийняття рішень технологічного процесу та її прикладне застосування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні високотехнологічні підприємства можуть сягати дуже великих розмірів, й відповідно технологічні процеси, які на них забезпечуються, можуть мати дуже складні розгалужені структури [1, 2, 7, 10, 16]. В залежності від типу виробництва, наявної інфраструктури, використовуваних методів тощо комплексний опис, реалізація та моніторинг технологічних процесів може бути дуже складною задачею, для вирішення якої необхідно застосовувати різноманітні методи дослідження. Зважаючи на це, можна виділити дуже перспективний напрям щодо оптимізації високотехнологічних процесів, а саме використання хмарних інформаційних технологій для оптимізації виробничих процесів підприємств різного масштабу. Проте все одно залишається ряд невирішених проблем під час використання хмарних технологій для оптимізації виробничих процесів, що пов'язані із формалізацією самих виробничих процесів, вибором методів оптимізації, моніторингом всіх процесів, захистом даних щодо виробничих процесів тощо. У



роботах [1, 6] розглянуто хмарну автоматизовану систему інтелектуальної підтримки прийняття рішень для технологічних процесів, та визначено область застосування таких систем. Роботи [2, 7, 12, 14, 16] обґрунтовують застосування систем підтримки прийняття рішень для реалізації технологічних процесів. Використання у задачах даного класу експертних систем обґрунтовано у роботах [3, 5, 15, 16]. Опис технологічних операцій для різних технологічних процесів наведено у роботах [4, 7, 10, 13]. Формування баз даних та баз знань для відповідних систем обґрунтовані у роботах [5, 8].

Таким чином проведений аналіз підтверджує необхідність розробки системи підтримки прийняття рішень технологічного процесу у вигляді хмарного сервісу, для практичного застосування у розроблювальних у подальшому системах автоматизації процесів формування та відновлення деталей.

**Мета роботи:** полягає в розробці системи підтримки прийняття рішень технологічного процесу відновлення поверхонь конструкцій і деталей машин у вигляді хмарного сервісу, що дозволить у подальшому оптимізувати високотехнологічні процеси підприємств різного масштабу з використання хмарних інформаційних технологій.

### Формалізація проблеми підтримки технологічних процесів

У процесі автоматизації проектування технологічних процесів відбувається переробка великих обсягів інформації. Ефективність процесу проектування багато в чому залежить від раціонального подання вихідної інформації, і в першу чергу з точки зору її повноти і надмірності. Вихідну інформацію для проектування технологічних процесів поділено на базову, керівну і довідкову. Базова інформація для проектування технологічних процесів включає:

- дані, що містяться в конструкторській документації на виріб;
- програму випуску, визначаючи тип виробництва;
- відомості про наявність технологічного оснащення, виробничих площ і т.п. (при проектуванні технологічних процесів для діючих заводів і цехів).

Керівна інформація включає дані, які містяться в таких джерелах:

- відповідних галузевих стандартах і стандартах підприємства на технологічні процеси, методи управління ними, технологічне оснащення (обладнання, пристосування та ін.);

- документації на перспективні технологічні процеси;

- виробничих інструкціях.

Довідкова інформація включає дані, які містяться в:

- документації на діючі типові технологічні процеси по даному виду обробки;
- описах прогресивних методів обробки;
- каталогах, номенклатурних довідниках прогресивного технологічного обладнання і оснастки;
- матеріалах щодо вибору технологічних нормативів (режимів обробки, припусків, норм витрати матеріалів і ін.);

- планах підвищення технічного рівня виробництва;

- методичних матеріалах по керівництву розрахунками точності процесів обробки;

- матеріалах і трудових нормативах (в тому числі машинобудівний і галузевих нормативах часу для нормування технологічної трудомісткості, тарифно-кваліфікаційних довідниках тощо).

Труднощі автоматизації проектування технологічних процесів (ПТП) пов'язані головним чином з тим, що завдання ПТП не мають в даний час формальних методів вирішення. Так, завдання вибору маршрутного технологічного процесу при її описовому викладі не містить даних про методи проектування процесів виготовлення складних деталей, які могли б бути представлені математичними операціями, реалізованими у вигляді програмного забезпечення. Крім того, вибір послідовності дій і засобів для виготовлення деталі не може бути виведений математичним чином на основі вихідних даних.

Для сучасних розробок технологічних процесів характерно:

- відсутність строгих аналітичних залежностей;
- складна логіка суджень, складний взаємозв'язок і взаємний вплив окремих завдань;

- наявність величезних інформаційних потоків і великої кількості складових елементів технології (верстати, пристосування, інструмент, режими обробки і ін.).

Процес «ручного» проектування технологічних процесів є послідовністю дій, за допомогою яких інженер-технолог вибирає елементи з розглянутих масивів різних технологічних предметів, встановлює між ними відповідності, формуючи переходи і технологічні операції. Вибір оптимального процесу проводиться технологом шляхом порівняння варіантів процесів при введенні оцінок на елементи, його складові.

Рішення будь-якої задачі за допомогою комп'ютерної техніки вимагає наявності аналітичних або інших видів залежностей, що відображають кількісний, а не якісний бік процесу проектування. Тому для здійснення технологічного проектування необхідно провести формалізацію технології (або її частини), тобто провести заміну (перетворення) змістовних пропозицій математичним апаратом.

Метою формалізації є забезпечення можливості створення універсальних алгоритмів і програм щодо початкових і кінцевих умов, тобто щодо форми і розмірів деталей, характеру виробництва, характеристик устаткування і оснащення, проектуванні різних технологічних процесів для деталей різних класів і будь-якої складності.

Формалізація завдання перетворює процес технологічного проектування з процесу міркувань і побудови аналогій в процес суворого розрахунку. При цьому форма побудови технологічного процесу і його складових елементів може бути виражена за допомогою апарату математичної логіки, зміст технологічних процесів, що характеризується рядом властивостей об'єктів технології, описано засобами теорії множин, а якісні співвідношення представлені кількісними залежностями за допомогою логічних функцій.

## Принципи формалізації завдання вибору

Проектування і оптимізація технологічних процесів є складним завданням, оскільки вимагає врахування великої кількості факторів, що впливають на результати процесу. Велике число факторів не дозволяє отримати строгі функціональні залежності для вибору методу і розрахунку оптимальних технологічних параметрів. Це завдання може бути вирішено двома шляхами.

Перший шлях – застосування типових технологічних рішень. На практиці, з метою забезпечення вибору методу обробки користуються переліком методів, застосовуваних для обробки типових поверхонь або типових деталей. При цьому звужується кількість груп розглянутих методів, але необхідна подальша конкретизація критеріїв для подальшого звуження кола об'єктів вибору.

Другий шлях – створення автоматизованого банку методів оптимізації для пошуку і вибору з використанням цифрових технологій. Під таким банком маються на увазі всі цифрові бази даних – відомі методи оптимізації технологічних процесів з перерахуванням їх технологічних параметрів і також стандартні програми, що допускають оновлення і необхідну обробку наявної інформації.

### Облік розсіювання конструкторсько-технологічних параметрів

На практиці зазвичай на найбільш важливі параметри встановлюється номінал в середині поля допуску. Але це інтуїтивне рішення є апіорно оптимальним лише в тому вельми окремому випадку, коли одночасно має місце:

а) симетричний (по відношенню до номіналу) закон розподілу відхилень параметра;

б) однакова (симетрична по відношенню до центру допуску) ціна придатної продукції і однакова вартість продукції, що виходить за межі допуску.

Практично, в дуже великій кількості реальних випадків має місце несиметричний розподіл ціни результату. У всіх цих випадках підлягає дослідженню питання про доцільність зміщення номіналу щодо середини допуску, тобто зміщенні, що створює найбільше математичне сподівання ціни результату. Метод оптимуму номіналу [9] дозволяє для будь-якого відомого закону розподілу відхилень і заданого розподілу цін результату визначити таке зміщення номіналу від середини поля допуску, яке дає найбільше значення математичного очікування ціни результату – найбільшу інтегральну споживчу ефективність  $U_i(X)$ .

Сукупність усіх методів, використовуваних для технологічних процесів, виробничою системою  $P$ , можуть бути використані для об'єктів обробки  $A$ . Якщо об'єкт  $A$  розглядається як неструктурований, то його модель включає в себе безліч  $F(A)$  контурів (необхідних властивостей) і набір відносин між ними, що описуються булевою матрицею контурів  $[A \times F(A)]$  оброблюваного об'єкта [12].

При моделюванні впливу системи  $P$  на об'єкт  $A$  математична модель системи  $P$  називається моделлю виробничого середовища (системи), що включає в

себе безліч  $F(P)$  контурів (властивостей), що досягаються системою, і набором відносин між ними, представлених булевою матрицею контурів  $[P \times F(P)]$  елементів системи і булевою матрицею  $[P \times P]$  взаємозв'язку елементів  $P$ . Для здійснення технологічного процесу об'єкта  $A$  зі складом контурів  $F(A)$  в системі  $P$  необхідно, щоб:

$$F(A) \subseteq F(P) \quad (1)$$

або на логічному рівні опису:

$$F(A) = F(P) \wedge F(A). \quad (2)$$

Модель виробничого середовища у вигляді автоматизованого банку знань і банку даних методів можна використовувати для вирішення різних задач, в тому числі для вирішення прямої і зворотної задачі технологічного проектування.

При вирішенні прямої задачі на вхід моделі надходять дані по контурах (необхідні властивості) об'єкта обробки  $F(A_i)$ ; на виході отримують набір контурів  $F(P_i)$  і елементів  $P_i$  виробничої системи, що беруть участь в забезпеченні контурів (необхідних властивостей) об'єкта  $A_i$ , при цьому буде досягнутий повний склад контурів об'єкта  $F(A_i)p \subseteq F(P_i)$ . Очевидно, якщо  $F(A_i)p = F(P_i)$ , то виконуються умови (1) і (2), і об'єкт може бути виготовлений в даній виробничій системі.

Зворотне завдання технологічного проектування, що вирішується за допомогою тієї ж моделі виробничої системи; на відміну від прямої задачі полягає в тому, що входом є набір  $P_j$  елементів виробничої системи, а виходом – склад контурів  $F(P_j)$ , що характеризують контури всіх можливих об'єктів  $A$ , які можуть бути реалізовані в заданій виробничій системі. Розглянуті теоретичні підходи [13] створюють можливість для розробки алгоритмів інтелектуальної системи підтримки прийняття рішення (САПР) при виборі методів для технологічних процесів в інтегрованих САПР. За допомогою модуля логічного виведення (МЛВ) і модуля прийняття рішень (МПР) при взаємодії з САПР КІ здійснюється вибір виду та методу для забезпечення виробничих процесів, а при взаємодії з САПР ТП – вибір, проектування та інформатизація виробничих процесів. При вирішенні цих завдань МЛВ використовує банк знань БнЗн і банк конструкторсько-технологічних даних БнКТД. Формування банку знань здійснюється експертами за допомогою блоку формалізації знань (БФЗн).

Таким чином інтелектуальна систем підтримки прийняття рішення дозволяє зробити вибір методу технологічного процесу, що має найменшу собівартість режимів роботи, що дозволяють забезпечити необхідні параметри якості, а головне дає можливість вирішувати прямі і зворотні завдання технологічного проектування.

### Загальна постановка задачі забезпечення процесу оптимізації технологічних процесів виробництва

Оптимізація технологічних процесів допомагає зробити найбільш ефективний вибір оптимального

варіанта в конкретній ситуації. Головними завданнями розрахунків при цьому виступають наступні:

1. Вибір оптимального критерію.
2. Визначення параметра, який буде впливати на результативність ТП.
3. Розробка  $F = F(X)$  в залежності від існуючих умов моделі (наприклад, якщо визначальним параметром стала найменша собівартість, то в даному випадку цільовою буде залежність від наявних параметрів).
4. Пошук оптимального рішення з обчисленням екстремуму, знаходженням найбільш підходящого для конкретної ситуації технологічного процесу.

При цьому, види оптимізації ТП (технологічних процесів) включають в себе параметричні і структурні робочі методи. Перша група – це зміна наявних значень при певній структурі, наприклад, розрахунок оптимального складу режиму використання устаткування. Щоб вирішити такі завдання, необхідно використання нелінійного або лінійного математичного програмування.

Структурна оптимізація процесу проектування пов'язана з підбором структури, вона працює за принципом виключення варіантів за рахунок наступного:

- втручання в уже здійснене проектування з метою пошуку найкращого і результативного рішення з певної точки зору і відповідно до заданих значень;
- уніфікація обраних варіантів.

Оптимізація параметрів для технологічного процесу вирішує завдання вибору методу, при якому найменші витрати на обчислення дадуть найбільш інформативний об'єм про необхідний процес.

Процеси знаходяться в прямій залежності від того, які саме методи будуть застосовані в роботі при пошуку найбільш результативного рішення для конкретної ситуації.

Оптимізація для технічних процесів застосовується для вибору оптимального варіанту з наявних, тобто фактично виконується пошук екстремуму для  $F(X)$  за допомогою варіювання наявних проектних (заданих попередньо) значень для  $X$  в межах наступної області допущення:  $extr F(X), X \in D_x$ , при цьому використовуються наступні параметри:  $F(X)$  – використувана функція;  $X$  – вектор змінних;  $D_x$  – допустима робоча область  $X$ . Вибором може бути найменша собівартість, тобто найменші фінансові витрати, максимально можлива продуктивність при заданих умовах з найменшим часом, необхідним для виготовлення однієї одиниці.

Методи оптимізації технологічних процесів можуть використовувати один або кілька критеріїв, тобто можливо застосовувати різні параметри, багатокритеріальну оптимізацію. При цьому створюється один компромісний критерій, що враховує одразу декілька вибраних параметрів, так званих  $E_i$  – локальних критеріїв ( $E_1, E_2, E_3, \dots, E_r$ ). Для кожного такого критерію можливе вирішення завдань оптимізації розробки технологічних процесів, після чого проводиться обчислення екстремального значення для  $E_i$  (при  $i$ , що дорівнює 1, 2, 3, ...,  $r$ ).

Рівняння відхилення для критерію можливо записати таким чином:

$$Q_i = E_i - E_i^* .$$

Окремо для кожного з них слід обчислити ваговий коефіцієнт  $\lambda_i (0 < \lambda_i < 1 \quad i \quad \sum \lambda_i = 1)$ , що необхідно для визначення важливості параметра в рамках технологічного процесу. Для запису компромісного критерію застосовується адитивна функція  $Q = \sum Q_i \lambda_i$ . Тільки після цього вирішується оптимізація параметрів процесу. Для вирішення можуть застосовуватися різні методи, включаючи імітаційні, аналітичні, комбіновані.

Аналітичні методи оптимізації технологічного процесу виробництва припускають застосування засобів математичного програмування.

Імітаційна оптимізація управління технологічними процесами передбачає роботу в реальних умовах, створення імітаційної моделі, основа якої дає можливість вибрати найкращий варіант ТП. При оцінках застосовуються способи виключення, вибору відповідної моделі, що дозволяє досягти заданого критерію. Комбінований метод передбачає використання окремих зазначених прийомів, об'єднання аналітичного і імітаційного методів в один, що дозволяє досягти оптимального результату. Такий спосіб застосовується при певних умовах і необхідності отримання найбільш точного результату.

В якості прикладу розглядається схема руху інформації в процесі оптимізації технологічного процесу. Для обраної схеми є доцільним проведення оптимізації для ланцюгів технологічних операцій, з обранням результату, що матиме кращий результат згідно ваговій функції. Кожна технологічна операція повинна відокремити такі вектори величин:  $\bar{X}$  – контрольовані величини процесу, для цих величин існують обмеження;  $x_{\min,i} \leq x_i \leq x_{\max,i}$ ;  $\bar{V}$  – відомі але не контрольовані величини процесу;  $\bar{Z}$  – невідомі та не контрольовані величини;  $\bar{R}$  – випадкові величини, що впливають на процес;  $\bar{Y}$  – параметри, які досягаються в процесі технологічної обробки. Для вказаних величин технологічного процесу є рівняння, де параметри процесу  $\bar{X}$  є шуканою величиною:

$$\bar{Y} = F(\bar{X}, \bar{V}, \bar{Z}, \bar{R}), \quad (3)$$

Однак для технологічного процесу, який складається з ланцюга технологічних операцій, рівняння (3) перетворюється в систему рівнянь:

$$\begin{cases} \bar{Y}_k = F_k(\bar{X}_k, \bar{V}_k, \bar{Z}_k, \bar{R}_k), \\ \bar{Y}_{k-1} = F_{k-1}(\bar{X}_{k-1}, \bar{V}_{k-1}, \bar{Z}_{k-1}, \bar{R}_{k-1}), \\ \dots \\ \bar{Y}_1 = F_1(\bar{X}_1, \bar{V}_1, \bar{Z}_1, \bar{R}_1), \end{cases} \quad (4)$$

де результати попередньої технологічної операції можуть бути частково або повністю входити як параметр наступної технологічної операції, тобто:

$$\bar{X}_i \cap \bar{Y}_{i-1} \neq \emptyset .$$

На практиці невідомі та випадкові параметри не враховують, або допускають їх використання, як випадкові величини. У разі наявності переліку таких випадкових параметрів, визначити межі зміни керованих величин за допомогою методів або аналітичного оцінювання відхилення результату, або використавши повно факторний експеримент, при змінюванні лише величин, які входять до  $\bar{Z}$  та  $\bar{R}$ .

### Модель реалізації структури технологічного процесу

Складність технічних систем, що моделюються, значною мірою залежить від різноманіття номенклатури об'єктів вимірювання, наявних вимірювальних приладів і систем та багатьох інших умов. При цьому завжди намагаються використовувати такі технологічні процеси, за допомогою яких можна досягати найбільшої продуктивності праці за найменшою собівартості та високої якості продукції в умовах певного підприємства. До системного аналізу входять:

1. Постановка задачі, яка включає визначення кінцевих цілей та питання, що потребують вирішення умов, в яких функціонує система, визначення обмежень, що накладаються на умови функціонування системи та ін.

2. Дослідження: визначення, аналіз і узагальнення даних, необхідних для розв'язання задачі, визначення структури системи (проблеми), що аналізується, установлення зв'язків, виявлення методів та дій для розв'язання задачі.

3. Аналіз, що охоплює побудову моделей, вибір критеріїв ефективності їх використання для передбачення наслідків того чи іншого курсу дій, зіставлення різних варіантів рішень щодо цих наслідків.

4. Попереднє судження зводиться до вибору найоптимальніших шляхів досягнення мети, формулювання висновків та розроблення рекомендацій щодо подальших дій.

5. Експериментальна перевірка ухвалених рішень, результатів аналізу.

6. Заключне судження – заключний вибір найоптимальнішого варіанта вирішення завдання на підставі експериментальної перевірки результатів аналізу.

7. Реалізація ухваленого рішення, що включає доведення ухваленого рішення до конкретних результатів: креслень, технологій, організаційних заходів тощо.

В загальному випадку, вхідними параметрами до моделі реалізації структури технологічного процесу є: перелік параметрів, які впливають на процес; перелік параметрів, які є результатом процесу; перелік керованих параметрів; перелік некерованих параметрів; перелік невідомих параметрів; деталізована структура технологічного процесу з розділенням параметрів та результатів.

### Абстрактний технологічний процес, його властивості та методи переходу до конкретного технологічного процесу

Технологічний процес складається з ланцюга окремих технологічних операцій, кожна з яких через різні причини може бути замінена на технологічну

операцію на іншій основі, але аналогічну за отриманим результатом. Для будь-якого етапу обробки характерна технологічна спадковість, коли використання обробки обмежується за рахунок умов, накладені попередньої використаної операцією. Проблемою є часткова технологічна спадковість, коли такі операції частково перекривають кілька попередніх, що значно ускладнює повний граф можливих ланцюгів проведених операцій.

Для оптимізації технології по ланцюгу технологічного процесу використовують експертні системи, де такі позначення:

– експерт – фахівець з даної технологічної операції;

– інженер знань – фахівець, який формалізує знання експертів, відповідає за процес отримання знань і надання їх до бази знань експертної системи;

– база знань – множина доступних знань щодо обраної технологічної операції;

– система інтелектуального рішення – ключовий елемент експертної системи, який на основі наявних знань і вхідних параметрів поставленого завдання надає параметри технологічного процесу з оптимізацією заданими критеріями (час роботи, доступні матеріали, сукупні грошові витрати);

– інтерфейс користувача відповідає за взаємодію між комп'ютерними системами і людиною.

### Інформаційна модель технологічного процесу і методи її одержання

В процесі побудови експертних систем оптимізації технологічного процесу необхідно пройти наступні етапи:

1. Визначення вхідних / вихідних даних.

2. Розробка словника атрибутів, які притаманні обраній технологічній операції.

3. Виявлення об'єктів і понять.

4. Виявлення зв'язків між вхідними керованими і некерованими параметрами технологічних операцій.

5. Визначення цілей оптимізації.

6. Визначення стратегій вибору параметрів технологічної операції для досягнення поставлених оптимізаційних задач.

Виникає потреба у функціональному пов'язування вхідних даних і певних некерованих величин з параметрами, необхідними від технологічного процесу.

Побудова експертної системи вимагає наявності співвідношень для знаходження параметрів, які оптимізуються, наприклад, грошові витрати, час обробки і витрачений вихідний ресурс відповідно:

$$G(\bar{Y}), T(\bar{Y}), E(\bar{Y}). \quad (5)$$

Для технологічного процесу (5) на основі математичної моделі і розрахунку витрат на його виконання наводиться експертна система оптимізації технологічного процесу.

Схема передбачає наявність ітераційного пошуку методом поступового поліпшення результату з початкового допустимого режиму роботи системи. Для більш надійного результату, при наявності значної нелінійності, такий процес можна проводити з кількох початкових точок.

Таким чином можна перерахувати наступні складові інформаційного забезпечення функціонування експертної системи у вигляді хмарного сервісу.

1. База знань, яка містить: дані експериментів, допустимі діапазони вхідних даних, список вхідних параметрів, список вихідних параметрів, методи і математичне забезпечення розрахунків витрат на процес.

2. Система отримання вимог до результатів відновлення і критерій (або критерії) оптимізації.

3. Система пошуку екстремумів в багатовимірному просторі.

4. Система перевірки на досягнення результату.

5. Система виявлення «зацикленості» пошуку рішень у випадках недосяжності поставлених вимог.

6. Система введення неконтрольованих вхідних параметрів.

7. Система забезпечення інформаційного потоку між компонентами експертної системи з урахуванням синхронізації і взаємних блокувань.

### Формалізація структури та правил технологічного процесу, зведення до універсального технологічного процесу

Структура управління виробничої інформацією повинна підтримувати користувача в діяльності з моделювання виробництва і постачати інструменти підтримки прийняття рішень необхідною інформацією.

В процесі формування структури технологічного процесу потрібно визначити низку параметрів, які не регламентуються вимогами до готового виробу, але їх значення суттєво впливають на результат планування технологічних операцій. Також, не регламентовані вимоги не можуть бути виражені ні математично або алгоритмічно, і виводяться з власного досвіду експертів. Хмарна інформаційна система забезпечення проектування технологічного процесу повинна забезпечити правильність заповнення вимог до результатів технологічного процесу. Тут система повинна забезпечити контроль повноти та сумісності вхідних даних, проводити контроль наявності вимог, які не можна визначити із вже заданих критеріїв. Також система повинна забезпечити можливість залишити вимогу невизначеною, якщо з вже визначених величин можлива оцінка цієї вимоги.

Особливе значення має можливість для обов'язкових вимог встановлювати критерії максимальності або мінімальності, при одночасному задоволенні інших критеріїв. Деякі вхідні параметри та вимоги мають характер визначення підмножини з доступних елементів. Очевидним критерієм вимог до результату технологічного процесу є можливість задання граничних критеріїв.

На основі математичного співвідношення (5) і діаграми потоку інформації в узагальненій експертній системі технологічного процесу приведено приклад формалізації підмножини абстрактних експертних систем оптимізації технологічних процесів. Для цього використано такі позначення множин, які формують базу знань для ряду технологічних процесів:  $S = \langle X, Y, V, M, P, D, G \rangle$ , що включає операцію виділення підмножин елементів, що стосуються

окремої технологічної операції  $k$ :  $X_k$  – множина керованих параметрів технологічного процесу  $k$ .  $Y_k$  – множина параметрів деталі, які контролює або змінює технологічний процес  $k$ .  $V_k$  – множина параметрів, які не справляються, але які необхідно враховувати при виконанні технологічного процесу  $k$ .  $M_k$  – множина методів отримання математичної моделі технологічного процесу  $k$ .  $P(m), m \in P(M_k)$  – обраний екземпляр з методів оптимізації, який можна застосувати для зазначених математичних моделей,  $P$  – операція вибору методу з множини методів. Операція вибору може проводитися автоматично або по вибору розробника експертної системи.  $D_k$  – множина функцій розрахунку матеріальних, в т.ч. і часових, витрат на здійснення технологічного процесу  $k$ , за якими може проводитися процес оптимізації. Сюди ж входять лінійні або більш складні комбінації для отримання остаточної багатофакторної вагової оптимізаційної функції.  $G_k$  – множина матеріальних ресурсів, використуваних у технологічному процесі. Знаком вектора, як це зроблено в попередньому пункті, на відповідних позначеннях визначалися конкретний кортеж реальних величин, які відповідають безлічі обраних величин і характеристик. Тоді отримаємо такі співвідношення для окремого технологічного процесу  $k$ :

$$\begin{cases} \bar{X}_k = m(\bar{Y}_k, \bar{V}_k, \bar{Y}_{k-1}, \bar{G}_k); \bar{G}_k = D_k(\bar{Y}_k, \bar{V}_k); \\ |\bar{G}_k| \rightarrow \min; \quad |\bar{G}_k| = \infty, \text{ якщо } \bar{Y}_{k-1} \notin \bar{Y}_k. \end{cases} \quad (6)$$

Сукупність технологічних процесів  $S$  і формують формальне завдання безлічі технологічних процесів. Додавання до бази знань нового технологічного процесу супроводжується такими операціями:

$$\{S = S \cup S_k, S_k = \langle X_k, Y_k, V_k, M_k, P_k, D_k, G_k \rangle,$$

де  $k$  – номер доданого до системи технологічного процесу.

Формалізація рекомендаційних систем для забезпечення оптимізації ланцюга технологічних процесів як надбудови експертної системи над експертними системами окремих технологічних процесів вимагає використання послідовності технологічних процесів. Наприклад, деталь з параметрами  $Y_k$  після кожного з технологічних процесів обробки має вигляд  $Y_{k-1}$  згідно введеним позначенням. Це формує ланцюг технологічних операцій

$$Y = \sum_{(k)} \bar{Y}_k, \quad (7)$$

де  $k \in$  екземпляром комбінаторної конфігурації з доступних технологічних процесів, а  $(k-1)$  позначає попередній технологічний процес.

На основі (7) можна проілюструвати цикл обробки як граф доступних процесів.

### Структурна модель інформаційної хмарної системи підтримки технологічних процесів

Структурно вся інформаційна система  $S$  і кожна з її підсистем можуть бути описані в такому вигляді:

$$S = I \{S_i\}, i = 0, 1, \dots, k, \quad (8)$$

де функція  $I$  – множина інформації, яка описує інформаційну систему як цілісну систему, що складається із  $S$ ;  $S_i$  – множина підсистеми  $S$ .

Будь-яка підсистема  $S$ , знову ж може бути представлена і вигляді:

$$S = I \{S_{ij}\}, i = 0, 1, \dots, k, \quad (9)$$

де:  $I_i$  – множина інформації, яка описує підсистему  $S_i$  як цілісну систему, що складається із  $S_{ij}$ ;  $S_{ij}$  – множина підсистеми  $S_i$ .

Цей процес структуризації повинен продовжуватися до тих пір, поки на деякому кроці множина підсистеми  $S_{ij}$ ,  $i = 0, 1, \dots, k$  не виявиться пустою.

Дану структуризацію можна уявити у вигляді графу, де вузол описується двома параметрами ( $I_{ij}K_k$ ,  $S_{ij}K_k$ ), а зв'язки – матрицею суміжності.

У відповідності до (8), (9), структурну модель технологічного середовища (ТС) опишемо у вигляді:

$$TC = \{I^T, MT\},$$

де:  $I^T$  – множина інформацій, яка описує технологічне середовище як цілісну систему;  $MT$  – множина складових технологічного середовища.

Множина  $MT$  може бути описана у вигляді:  $MT = \{T_i \in I^T\}$ , де  $T_i$  – територіально-локалізовані складові технологічного середовища.

Множина  $T_i$  може бути описана у вигляді:  $T_i = \{A_i, P_i\}$ , де:  $A_i$  – множина апаратних засобів,  $i$ -ого ТС;  $P_i$  – множина програмних засобів,  $i$ -ого ТС.

Множина  $A_i$  може бути описана у вигляді:  $A_i = \{I_i^A, \{O_i, P_{ri}, C_i, t_{ri}, D_i\}\}$ , де  $I_i^A$  – множина інформації, яка описує апаратні засоби  $i$ -ого ТС як єдине ціле;  $O_i$  – множина засобів створення і обробки інформації;  $P_{ri}$  – множина засобів відображення і опису інформації;  $C_i$  – множина засобів управління інформацією;  $t_{ri}$  – множина засобів передачі інформації;  $D_i$  – множина засобів збереження інформації. Множина  $O_i$  може бути інтерпретована як множини комп'ютерів даного ТС.

Множина  $P_{ri}$  може бути описана у вигляді:  $P_{ri} = \{Dis_i, Din_i, Print_i, Pl_i\}$ , де  $Dis_i$  – множина дисплеїв даного ТС;  $Din_i$  – множина динаміків даного ТС;  $Print_i$  – множина принтерів даного ТС;  $Pl_i$  – множина плотерів даного ТС.

Множина  $C_i$  може бути описана у вигляді:  $C_i = \{Pc_i, M_i, Km_i\}$ , де  $Pc_i$  – множина можливих пультів управління;  $M_i$  – множина маршрутизаторів;  $Km_i$  – множина комутаторів.

Множина  $t_{ri}$  може бути описана у вигляді:  $t_{ri} = \{Kn_i, md_i, int_i, K_{Ti}\}$ , де  $Kn_i$  – множина каналів зв'язку;  $md_i$  – множина модемів;  $int_i$  – множина інтерфейсів;  $K_{Ti}$  – множина концентраторів.

Множина  $D_i$  може бути описана у вигляді:  $D_i = \{d_i, bnf_i, op_i\}$ , де  $d_i$  – множина довгочасно запам'ятовуючих пристроїв;  $op_i$  – множина оперативно

запам'ятовуючих пристроїв;  $bnf_i$  – множина буферних накопичувачів.

При необхідності деталізація запропонованих структур може бути продовжена. Множина програмних засобів  $i$ -го ТС може бути описана у вигляді:

$P_i = \{I_i^P, \{F_i, S_i, N_i\}\}$ , де  $I_i^P$  – множина інформації, яка описує програмні засоби  $i$ -ого ТС як цілісної системи;  $F_i$  – множина функціональних програм;  $S_i$  – системне програмне забезпечення;  $N_i$  – мережне програмне забезпечення.

Множина  $F_i$  може бути представлена у вигляді:  $F_i = \{F_i^i, F_i^o, F_i^p, F_i^g, F_i^3\}$ , де  $F_i^i$  – множина функціональних програм які виконують інформаційні функції;  $F_i^o$  – множина функціональних програм, які можуть виконувати функції обробки інформації;  $F_i^p$  – множина функціональних програм, які можуть виконувати функції представлення інформації;  $F_i^g$  – множина функціональних програм, які можуть обробляти графічну інформацію;  $F_i^3$  – множина функціональних програм, які можуть обробляти звукову інформацію.

Множина  $S_i$  може бути описана у вигляді:  $S_i = \{S_i^{on}, S_i^c, S_i^d, S_i^t\}$ , де  $S_i^{on}$  – операційні системи АРМ;  $S_i^c$  – множина СУБД  $i$ -ого ТС;  $S_i^d$  – множина програмних засобів захисту інформації;  $S_i^t$  – множина програмних засобів сервісного обслуговування і тестування.

Множина  $N_i$  може бути описана у вигляді:  $N_i = \{C_i^l, M_i^p, B_i^p, dp_i, N_i^E, N_i^d\}$ , де  $C_i^l$  – множина протоколів управління лінією передачі даних;  $M_i^p$  – множина протоколів маршрутизації;  $B_i^p$  – множина протоколів буферизації;  $dp_i$  – множина протоколів диспетчерського управління (управління режимами функціонування мережі);  $N_i^E$  – множина протоколів міжмережної взаємодії, (протоколи взаємодії через шлюзи у зв'язку з несумісністю довільних мереж);  $N_i^d$  – міжмережні протоколи захисту інформації.

Подальша деталізація складових програмного забезпечення можлива тільки у вигляді обширних каталогів.

Користувацьке середовище – сукупність організацій та фізичних осіб, діяльність яких пов'язана з функціонуванням інформаційного середовища.

Аналогічним чином можуть бути структуровані інформаційне, користувацьке та робоче середовище.

Інформаційне середовище – сукупність розміщених на різних носіях інформаційних ресурсів, які обробляються за допомогою відповідних засобів технологічного середовища.

Складові інформаційного середовища:  $B_i$  – бази даних,  $K_i$  – каталоги,  $\Phi_i$  – файли  $i$ -го рівня ієрархії. З наведених міркувань можна зробити висновок, що

спеціалізована структурна модель інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу може бути описана в такому вигляді:

$$\begin{aligned}
 S &= \{IC, TC, KC, PC\} = \\
 &= \{B, K, \Phi, O, P_r, C, t_r, D, F, S, N, B_T, B_H, T_P, K_{TP}\} = \\
 &= \{B, K, \Phi, O, D_{is}, D_{in}, P_{r,int}, P_i, P_c, M, K_m, K_n, \\
 &\quad md, int, K_T, d, bnf, op, F^i, F^o, F^p, F^s, F^z, \\
 &\quad S^{on}, S^c, S^d, S^t, C^l, M^p, B^p, dp, N^E, N^d, \\
 &\quad T, A, O_n, C_{on}, \Pi, E, P, B, O_i, T_p, T_{TP}, \Pi_M, K_n\}
 \end{aligned} \quad (10)$$

### Побудова структурної системи підтримки прийняття рішень технологічного процесу у вигляді хмарного сервісу

На основі розглянутих та розроблених методів та механізмів, які використовують для розробки технологічних процесів розглянуто структуру інформаційної хмарної системи підтримки прийняття рішень для автоматизації створення оптимізованих технологічних процесів. Систему умовно можна поділити на наступні етапи:

Перший етап призначений для формалізації вимог до результатів технологічного процесу та визначення вхідних параметрів деталі, яка підлягає обробці. При цьому виділяються вимоги до результату обробки та критерії оптимізації. При недостатній кількості критеріїв або вимог, евристичними правилами першої групи вводяться обмеження а також критерії оптимізації низького пріоритету. З причини можливості існування конфліктів у вимогах, що повинно відображатися в базі знань по відношенням між вимогами, проводиться заміна критеріїв на критерії оптимізації з підвищеним пріоритетом. В результаті не задані критерії та вимоги переводяться в розряд слабких критеріїв оптимізації. Шукані вимоги відповідають за порядок технологічних операцій при виконанні технологічного процесу та параметрів, режимів проведення технологічних операцій. В більшості ситуацій шукані параметри переходять у формування технологічної картки процесу.

Другий етап є структурною оптимізацією, яка має визначити допустимі ланцюги технологічних операцій. Але в складних технологічних процесах з великою кількістю операцій ця задача має комбінаторну складність, що призводить до непомірно великої кількості можливих рішень, які не можна розглянути за розумний інтервал часу. Значно скоротити кількість розглянутих комбінацій можна завдяки використанню евристичних правил, які враховують технічне призначення технологічної операції. Це виражено в формуванні евристичних правил груп 2 та 3. Де друга група визначає призначення операції, а третя – відношення порядку та рівності між операціями. Відношення рівності застосовне у випадках, коли одна технологічна операція може виконати кілька призначень.

В разі об'єднання або зміни технологічних операцій можуть виникати додаткові параметри та критерії обробки, що відображено в евристичних правилах четвертої групи. Тому наступним етапом оптимізації є

використання фільтру доцільності операції та процесу додавання критеріїв вимог, що не завжди можна повністю автоматизувати. Проте цей етап гарантує що додаткові параметри та критерії не будуть втрачені при побудові технологічного процесу.

В результаті проведення процесу оптимізації технологічного процесу за допустимими евристичними правилами, отримуємо множину ланцюгів окремо оптимізованих технологічних процесів, з якої проводиться багатокритеріальний відбір, що відповідає поставленим вимогам оптимізації. Користувач системи може отримувати у відповідь як і одну картку технологічного процесу, так і декілька найкращих.

### Приклад застосування запропонованої моделі до технологічного процесу

Системи розробки сучасного транспорту, машино- і приладобудування, а також медичної техніки і товарів народного споживання характеризуються все більш зростаючим рівнем застосування нових конструкційних матеріалів з поліпшеними експлуатаційними характеристиками. Проблема обмеженості природних запасів більшості хімічних елементів, що становлять основу цих матеріалів, вирішується шляхом застосування складних структур, в яких основа виконана з «звичайних», легко оброблюваних і широко поширених компонентів, а функціональне навантаження виконує покриття з матеріалів із заданим комплексом властивостей. В даний час найбільш ефективними методами формування таких покриттів є процеси газотермічного напилення, серед яких електродугове і плазмового напилення можна вважати найбільш універсальним і легкокерованим. Технологічні переваги електродугового і плазмового напилення, які полягають в можливості отримання з різних, в тому числі і композиційних, матеріалів покриттів різної щільності, товщини і твердості, з необхідними захисними, газодифузійний і іншими властивостями зносостійкого покриття. Наведена розробка має актуальність і перспективу для застосування і впровадження в сучасних технологіях відновлення поверхонь різних конструкцій і деталей машин.

### Постановка задачі оптимізації технологічного процесу електродугової обробки

Технологія електродугового напилення складається з трьох операцій:

$$\begin{cases}
 \bar{Y}_3 = F_3(\bar{X}_3 \cup \bar{Y}_2, \bar{V}_3, \bar{Z}_3, \bar{R}_3), \\
 \bar{Y}_2 = F_2(\bar{X}_2 \cup \bar{Y}_1, \bar{V}_2, \bar{Z}_2, \bar{R}_2), \\
 \bar{Y}_1 = F_1(\bar{X}_1, \bar{V}_1, \bar{Z}_1, \bar{R}_1),
 \end{cases} \quad (11)$$

де:  $F_1$  – математична модель абразивно-струменевої обробки;  $F_2$  – математична модель процесу нанесення підшару;  $F_3$  – математична модель процесу нанесення основного шару.

Завдяки розділенню технологічних операцій спрощується побудова цільової функції. Окремо будуються функції за наступними параметрами:

Відповідність до вимог готового виробу:

$$G(\bar{Y}_3) = \sum_{i=0}^{n-1} \text{ReLu}(\bar{Y}_6 - \bar{Y}_3)_i, \quad (12)$$

де  $\bar{Y}_6$  – вимоги до виробу, як  $n$ -вимірний вектор значень;  $\bar{Y}_3$  – результат обробки;  $i$  – індекс параметру у векторі;  $\text{ReLu}(x)$  – функція відсікання від'ємних значень:

$$\text{ReLu}(x) = \begin{cases} x, & \text{if } (x > 0), \\ 0, & \text{if } (x \leq 0). \end{cases} \quad (13)$$

Мінімальне значення (12) є нуль, коли всі параметри відповідають або перевищують задані вимоги. Так можна формувати вимоги до ріжучих кромок інструментів, наприклад, плугів. В разі потреби штрафування системи, коли результати обробки також і перевищують задані параметри, можна  $\text{ReLu}(x)$  замінити абсолютним значенням або квадратичною функцією. Це відбувається коли деталі взаємодіють тертям. Тоді поверхні повинні мати схожі характеристики матеріалів, тому що тут є важливим зменшення саме відхилення параметрів від заданих величин, і перевищення вимог до твердості так само погано як і недостача. Часто у таких випадках використовують Декартову відстань на багатовимірному просторі, що відкриває можливість використовувати для багатьох випадків аналітичні методи оптимізації методу найменших квадратів. В розглянутому прикладі різального інструменту перевищення вимог по зносостійкості, твердості, зчеплення покриття з основою, зверху не регламентується, тому використання обмеження за мірою (12) є обґрунтованим.

Для врахування часових  $T$  та матеріальних  $M$  витрат, відповідно використовують залежності (14):

$$\begin{aligned} T &= \sum_{k=1}^3 T_k (\bar{X}_k, \bar{X}_k \cup \bar{Y}_{k-1}, \bar{V}_k), \\ M &= \sum_{k=1}^3 M_k (T_k, \bar{X}_k \cup \bar{Y}_{k-1}, \bar{V}_k), \\ \bar{Y}_0 &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

До системи додано  $\bar{Y}_0 = 0$ , бо перша операція не вимагає результатів попередньої, тому до керованих величин першої операції додається пуста множина.

До матеріальних витрат входять оплата працівникам, оренда приміщення, та інші параметри, які залежать від часу проведення технологічної операції та види й об'єми матеріалів і енергоносіїв в грошовому еквіваленті. Повна функція витрат  $G$ , результат якої повинен бути дійсним числом, є лінійною комбінацією (12) та (14):

$$G = c_0 G(\bar{Y}_3) + c_1 \sum_{k=1}^3 M_k + c_2 \sum_{k=1}^3 T_k \rightarrow \min, \quad (15)$$

де  $c_0, c_1, c_2$  – додатні дійсні коефіцієнти, які відбивають пріоритетність досягнення тих чи інших показників.

У випадках необхідності дотримання технічних вимог до виробу, обмеженні максимального часу виробництва, (15) може приймати інші форми, наприклад:

$$\begin{cases} G(\bar{Y}_3) = 0, \\ c_1 \sum_{k=1}^3 M_k + c_2 \sum_{k=1}^3 T_k \rightarrow \min. \end{cases} \quad (16)$$

Це свідчить про поділ вагового виразу на вимоги та критерій оптимальності, де вимог може бути кілька, а критерій оптимальності повинен бути єдиним. В разі відсутності критичних вимог, критерію оптимальності (15) достатньо для оптимізації ланцюга технологічних операцій.

В результаті аналізування руху інформації при проведенні оптимізації технологічного процесу на основі ланцюга технологічних операцій виявлено потребу в забезпеченні в інформаційній системі можливість визначення множини технологічних операцій  $F_k$ ; для кожної з операцій забезпечити перелік керованих  $\bar{X}_k$  та некерованих  $\bar{V}_k$  параметрів з їх обмеженнями; можливість завдання методів розрахунку близькості виконання поставлених вимог  $G(\bar{Y}_k)$ ; можливість забезпечити завдання методів розрахунку часових та матеріальних витрат по кожній технологічній операції за формулами (15) або (16) можливість забезпечити реалізації методів моделювання технологічних операцій (11) таблично, аналітично або комп'ютерним симулюванням.

### Формалізація технологічного процесу електродугової обробки

Технологічний процес електродугового напилення в процесі відновлення або зміцнення поверхонь деталей, складається з поетапної обробки:

- 1) струменево-абразивної обробки;
- 2) при потребі нанесення підшару;
- 3) основний процес нанесення покриття;
- 4) доведення утвореної поверхні металорізанням або шліфуванням.

Перший етап призначений для збільшення шорсткості поверхні деталі, яка оброблятиметься. Цей процес збільшить площу зчеплення деталі та покриття, що покращить міцність утримання утвореної поверхні. Підшар є максимально тонкий шар матеріалу який має функцію усунення несумісності основного та нанесеного матеріалу з хімічних причин або не злипання матеріалів. Іноді для забезпечення сильного зчеплення використовують молібденові підшари.

Основний процес нанесення металу проводиться розплавленням його електричною дугою і перенесенням за допомогою струменя стисненого повітря на поверхню деталі. Для запобігання утворення окислів та регулювання вмісту вуглецю, в повітря можна додавати пропан, завдяки горіння якого зменшується вміст кисню в струмені, а швидкість витоку газу в струмені може сягати кілька швидкостей звуку.

Доведення поверхні до стандартів деталі, проводять на металорізальних верстатах та шліфуванням.

Устаткування в процесі напилення можна побачити на рис. 1. В результаті огляду обробки поверхонь деталей електродуговим напиленням отримано наступну структурну схему ланцюга технологічних операцій (рис. 2). Відповідно початковим умовам та вимогам до результату, перші дві технологічні операції можуть і не виконуватися, тому комбінаторна складність технологічного процесу є чотири можливих варіанти. Для такої кількості варіантів, є доцільним



проведення оптимізації для чотирьох ланцюгів технологічних операцій, з обранням результату, що матиме кращий результат згідно вагової функції.

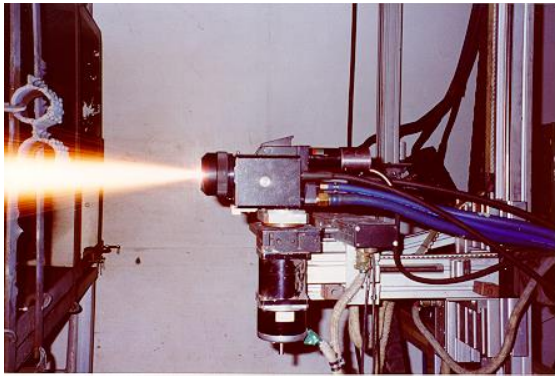


Рис. 1. Устаткування електродугового напилення в роботі (Fig. 1. Electric arc spraying equipment in operation)

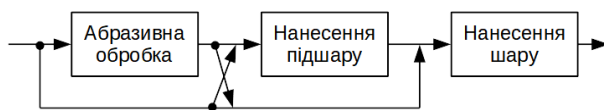


Рис. 2. Структура операцій електродугової обробки поверхонь (Fig. 2. The structure of operations of electric arc surface treatment)

Методом повнофакторного планування та проведення експерименту, визначено параметри, які з достатньою точністю дають керування результатами обробки. Також, для визначення міцності зчеплення приведені доступні дані. Приклад експериментальної залежності зміни міцності зчеплення сплаву з нанесеним порошком наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Вплив способу підготовки поверхні сплаву ВТЗ-1 на міцність зчеплення з покриттям порошком ВК15 [4]

Спосіб підготовки поверхні	Шорсткість, $R_z$ , мкм	Міцність зчеплення, МН/м <sup>2</sup>
Точіння	10	50
	14	65
	16	120
Легка піскоструменева обробка корундом зернистістю 450-980 мкм при тиску повітря 0.45 МПа	20	56
	22	101
	24	115
	27	140
	36	90
	38	65
Дробоструменева обробка сталевими кульками 0.5..1 мм при тиску повітря 0.45 МПа протягом 150 сек	39	35
	2..3	43..72

В результаті, для першої операції дробоструменевої обробки маємо основні параметри:  $t_1$  – час обробки;  $p_1$  – тиск повітря в системі обробки;  $P_1$  – енергоспоживання устаткування для дробоструменевої обробки;  $r_1$  – час амортизації устаткування;  $m_1$  – вартість устаткування;  $m_{P1}$  – вартість енергетичних ресурсів та матеріалів, які використовуються за одиницю часу в обраному режимі роботи;  $\sigma$  – твердість матеріалу,

який обробляється. Однак, не всі вказані величини впливають на силу зчеплення покриття:

$$Y_1 = H(<t_1, p_1, \sigma, \{\text{хімічний склад основи}\}, \{\text{вид покриття}\}, \{\text{технологія нанесення покриття}\}>),$$

де  $t_1 = T_1(<p, \sigma >)$  – тут час обробки залежить від тиску повітря в системі, тобто від сили взаємодії абразиву з матеріалом та від твердості оброблювального матеріалу. Абразив в цьому процесі вважається незмінним і входить до вартості зносостійкості устаткування.  $M_1 = M_1(<t_1, r_1, P_1, m_1, m_{P1}, p_1 >)$  – матеріальні витрати в основному залежать від часу роботи устаткування та його зносостійкості. Ці параметри можна виразити з режиму навантаження та часу роботи. Також залежить від режиму роботи і потужність енергоспоживання. Ці величини можна визначити з робочого тиску повітря в системі та часу роботи системи, який потрібний до досягнення бажаного результату. Матеріальні витрати зводять до скалярної величини через їхню вартість, або по кількості або по часу за діяння у процес.

У випадках нехтування вартістю процесу на користь зменшення часу виробництва, повністю функцією вартості знехтувати не можна, бо устаткування при перенавантаженні може вийти з ладу, що зупинить виробничий процес. Тому розрахунок розпадається на оптимізацію по мінімізації часу з обмеженням на гарантованість залишення устаткування в стані обробити задану кількість деталей.

Залежність вказаних величин можна побачити в табл. 2., в якій наведено назви величин, які враховуються в процесі оптимізації технологічної операції дробоструменевої обробки поверхні для підвищення адгезії  $A$  до заданого значення при мінімальних витратах ресурсів. Деякі величини з таблиці мають взаємну залежність, що свідчить про те, що система утворює систему, можливо нелінійних, рівнянь з кількома невідомими. В загальному випадку таку систему розв'язувати аналітично є не доцільним з причини відсутності способів аналітичного розв'язання або значної складності цих методів розв'язання.

Натомість, для вираження групи шуканих параметрів через відомі параметри з виконанням накладених на них обмежень та досягнення мінімального/максимального значення вагової функції, яка виражає обсяг витрат, використовують чисельні методи та аналітичні регресійні поліноми по експериментальним даним, які або дозволяють отримати аналітичний розв'язок або прямо виражають параметри процесу через задані результати та обмеження.

Наступні етапи обробки проводять на однаковому устаткуванні, лише процеси відмінні в матеріалах, які утворюють шар та підшар, а також відрізняються товщина шару та прошарку.

Прошарок використовується в технології газопламеневої напилення, коли матеріал поверхневого шару має хімічну несумісність з основним матеріалом, або основний шар не може утворити достатню адгезію до основного матеріалу. Тому матеріал для утворення прошарку має бути хімічно нейтральним до матеріалу деталі та основного шару та мати достатню адгезію до матеріалів основи та покриття. В особливо

важких випадках є виправданим використання прошарку з молібдену, який має високу адгезію з більшістю матеріалів. Важливим є те, що для адгезійного прошарку достатньо нанесення матеріалу шаром в

декілька молекул, тому використання молібдену не призводить до значного зростання вартості процесу.

В табл. 3 наведено результати експериментів по нанесенню покриттів газопламеневим методом.

Таблиця 2 – Величини, які враховуватимуться в дробоструменевому етапі відновлення поверхонь деталей

№	Назва	Позначення	Залежність
1	Час обробки	$t_1$	Шукане/задане, $p_1, \sigma$ , {вид покриття}, {технологія нанесення покриття}
2	Тиск повітря в системі обробки	$p_1$	– «–
3	Енергоспоживання устаткування для дробоструменевої обробки	$P_1$	Шукане, $p_1$
4	Час амортизації устаткування	$r_1$	Задане, $p_1$
5	Вартість устаткування	$m_1$	Задане
6	Вартість енергетичних ресурсів та матеріалів	$mp_1$	Задане
7	Твердість матеріалу, який обробляється	$\sigma$	Задане
8	Хімічний склад основи	{хімічний склад основи}	Шукане/задане, з переліку доступних {вид покриття}, {технологія нанесення покриття}
9	Вид покриття	{вид покриття}	Шукане/задане, з переліку доступних {хімічний склад основи}, {технологія нанесення покриття}
10	Технологія нанесення покриття	{технологія нанесення покриття}	Шукане/задане, з переліку доступних {хімічний склад основи}, {вид покриття}
11	Міцність зчеплення, Адгезія	$A_1$	$t_1, p_1$ , {хімічний склад основи}, {технологія нанесення покриття}, {вид покриття}

Таблиця 3 – Величини, які враховуватимуться в дробоструменевому етапі відновлення поверхонь деталей

№	Назва	Позначення	Залежність
1	Напруга дуги	$U$	Шукане, 28..34 В
2	Дистанція напилення	$L$	Шукане, 80..200 мм
3	Діаметр дроту	$d$	Шукане, 1,2..2,2 мм
4	Товщина прошарку/покриття	$h$	Шукане, 0,5..3,0 мм – для покриття, <0,5 – для прошарку
5	Тиск в камері	$p$	Шукане, 2..10 МПа
6	Швидкість ковзання	$v$	Шукане, 2,0..2,75 м/с
7	Пористість	$\rho$	Шукане/задане, <10%
8	Міцність зчеплення	$A_1$	Шукане/задане, 30..70 МПа
9	Твердість	$\sigma$	Шукане/задане, 6900..73000 МПа
10	Зносостійкість	$J$	Шукане/задане, 11..15 мкм/км ( $10^{-12}$ )
11	Хімічний склад основи	{хімічний склад основи}	Задане, з переліку доступних {вид покриття}
12	Вид покриття	{вид покриття}	Шукане/задане, з переліку {хімічний склад основи}

Нажаль, моделювання фізико-хімічних процесів при газопламеневому нанесенні покриттів є складним, в результаті чого відокремити незалежні параметри майже неможливо. Тому для побудови математичних залежностей для газопламеневого напилення було використано метод регресійного аналізу на отриманих експериментально даних (табл. 4).

Відповідно до обраного методу реалізації математичної моделі процесу, користувач інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу повинен мати можливість використовувати аналітичні моделі, табличне завдання залежності між величинами, або аналітичні або алгоритмічні методи числових засобів моделювання процесу, який оптимізується.

**В результаті аналізу технологічних операцій** підготовки поверхні деталей методом дробоструменевої обробки, з метою підвищення адгезії покриття, та нанесення газопламеневим методом адгезійного шару та основного покриття, **виділено величини**, які можуть виступати в якості характеристик результатів технологічної операції та в якості керованих параметрів технологічних операцій.

**Зазначено необхідність** підтримки в інформаційній системі визначення залежності між величинами аналітичними методами, таблично, алгоритмічно та за допомогою імітаційних моделей. Розглянуті інформаційні одиниці є функціонально різними, деякі величини мають здатність змінювати функціональну здатність переходом від шуканих величин до обмежень на технологічну операцію, що накладає на систему керування змінними додаткові функціональні можливості та універсальність до трансформації моделювання технологічного процесу.

#### **Формування евристичних правил та бази знань структури технологічного процесу електродугового напилення**

Для проектування технологічного процесу потрібно визначити: геометричні розміри деталі, поверхню якої потрібно обробити або відновити; для відновлення валів критичними є довжина оброблювальної частини деталі  $L_0$ , діаметр  $D_0$  утворення мінімального циліндру покриття деталі, цей параметр має вплив на мінімальну можливу дистанцію напилення  $L$ .

Таблиця 4 – Експеримент по виявленню залежності між керованими та шуканими величинами процесу газопламеного напилення

Фактори	Напруга дуги	Дистанція напилення	Діаметр дроту	Товщина покриття	Навантаження	Швидкість ковзання	Міцність зчеплення	Зносостійкість
№ експ.	$U, \text{В}$	$L, \text{мм}$	$d, \text{мм}$	$h, \text{мм}$	$P, \text{МПа}$	$V_{\text{ск}}, \text{м/с}$	$A, \text{МПа}$	$J_h, \text{мкм/км}$ ( $10^{-9}$ )
1	30	140	1,6	1,5	6	2,3	115	0,014
2	32	100	1,4	2,5	4	2,6	90	0,013
3	29	180	2	1	8	2,15	120	0,013
4	34	200	1,2	2	8	2	95	0,014
5	30	120	1,8	0,5	2	2,45	100	0,012
6	28	160	1,6	1,5	10	2,75	80	0,015
7	31	80	2,2	3	4	2,3	110	0,013
8	29	160	1,2	3	2	2	80	0,011
9	32	100	1,8	1,5	8	2,45	115	0,015
10	31	200	1,4	1	6	2,6	70	0,014
11	28	140	2	2,5	10	2,15	90	0,015
12	32	120	1,4	1	6	2,15	105	0,013
13	29	180	2	2,5	2	2,6	90	0,012
14	30	80	1,6	2	10	2,75	120	0,015
15	34	140	2,2	0,5	4	2,3	60	0,013
16	29	120	1,2	2	6	2,15	75	0,012

Таблиця 5 – Перелік вхідних параметрів та вимог до результатів технологічного процесу

№	Назва	Позначення	Обов'язковість
1	Гвєрдїсть матерїалу основи для обробки	$\sigma_{\text{ex}}$	«Так»
2	Матерїал основи	$M_{\text{ex}}$	«Так»
3	Матерїал покриття	$M_{\text{вих}}$	«Нї», якщо заданї властивостї поверхнї, інакше «Так»
4	Мїцнїсть зчеплення покриття до основи, адгезїя	$A_l$	«Нї»
5	Геометричнї розмїри для нанесення покриття	$L_0, D_0, \dots$	«Так»
6	Геометричнї розмїри пїсля нанесення покриття	$L_{\text{вих}}, D_{\text{вих}}, \dots$	«Нї», якщо задана товщина слою нанесення, інакше «Так»
7	Товщина покриття	$h_{\text{вих}}$	«Нї», якщо заданї вихїднї розмїри, інакше «Так»
8	Пористїсть покриття	$\rho_{\text{вих}}$	«Нї»
9	Гвєрдїсть покриття	$\sigma_{\text{вих}}$	«Нї», якщо заданїй матерїал поверхнї, інакше «Так»
10	Зносостїкїсть покриття	$J_{\text{вих}}$	«Нї», якщо заданїй матерїал поверхнї, інакше «Так»
11	Товщина пїдшарку	$h_{\text{пїд}}$	«Нї»

*Правило 1.5.* Якщо вимога суперечить іншій вимозі, провести вибір прїоритету, і менш прїоритетну вимогу перевести в критерїй оптимїзацї з високим прїоритетом.

*Правило 1.6.* Якщо вимога або критерїй не заданї, накласти на вимогу критерїй оптимїзацї низького прїоритету на мїнїмїзацїю витрат ресурсїв.

Наступнї евристично визначенї дїї пов'язанї з обранням технологїчних дїй:

*Правило 2.1:* Якщо за геометричними параметрами деталї не можна встановити на обладнання автоматичної обробки, потрїбно перейти до розрахункїв продуктивностї та точностї ручної працї.

*Правило 2.2:* Якщо матерїали деталї та покриття є такими що важко поєднувати з точки зору хїмїчної

Також з означених параметрїв робиться висновок про можливїсть встановлення валу на верстат автоматичної подачї. Деталї, якї не є валами, повиннї оброблятися вручну.

Важливу роль має матерїал з якого зроблено деталї, поверхня якої пїддається обробцї. Наприклад, за «Valid and invalid contacts of metals in accordance with GOST 9.005-72» визначаються матерїали, якї не допустимї в спїльному використаннї з точки зору корозїйної стїкїостї. В разї присутностї у вимогах до результату обробки деталї матерїалу покриття, який є несумїсним з матерїалом основи, технїчний процес повинен обов'язково доповнюватися нанесенням прошарку з металу, який є сумїсним з основою та покриттям одночасно.

Згїдно зазначеним особливостям планування технологїчного процесу напилення потрїбно визначити вхїднї данї (табл. 5, собївартїсть процесу для цього прикладу не враховано). З зазначених вимог що до визначення вимог технологїчного процесу виникають наступна група евристичних правил:

*Правило 1.1:* Якщо вимога обов'язкова, вимагати заповнення вїдповїдних полїв.

*Правило 1.2:* Вимога перестає бути обов'язковою, якщо визначено параметр(и), за яким(и) можна провести процес визначення цїєї вимоги.

*Правило 1.3:* Накладання умов оптимїзацї можливе лише для необов'язкових параметрїв.

*Правило 1.4:* Необов'язковї параметри можна залишити не заданими, але автоматично на всї параметри повиннї накладатися обмеження, якї вїдповїдають фїзичним властивостям процесу.

сумїсностї, закрїпити операцїю нанесення пїдшарку як обов'язкову.

*Правило 2.3:* Якщо матерїал покриття має недостатню адгезїю до матерїалу деталї, закрїпити операцїю нанесення пїдшарку як обов'язкову.

*Правило 2.4:* Якщо товщина  $h_{\text{вих}}$  нанесення матерїалу значна, запропонувати можливїсть нанесення пїдшарку з бїльш дешевого матерїалу.

Наступнї правила призначенї для визначення функцїональних призначень технологїчних операцїй, що може вплинути на визначення дїй в наступнїй групї операцїй:

*Правило 3.1:* Якщо матерїали деталї та покриття по хїмїчному складу та механїчним властивостям частково не сумїснї, то позначити операцїю нанесення

підшарку як обов'язкову з додаванням атрибуту {«сумісність»}. Можливе використання кількох призначень. Результат може бути виведений логічно при врахуванні результатів застосування правил 2 групи.

**Правило 3.2:** Якщо відновлювальна поверхня має корозійні забруднення, визначити дробострумінну обробку як обов'язкову операцію з додаванням атрибуту {«очищення»}.

**Правило 3.3:** Якщо адгезія між базовим матеріалом та нанесенням не достатня, та збільшення контактної площі шляхом підвищення шорхості достатнє для досягнення заданої величини, то додати операцію дробострумінної обробки як обов'язкову з атрибутом {«адгезія»}.

**Правило 3.4:** Якщо адгезія між базовим матеріалом та нанесенням не достатня, позначити технологічну операцію нанесення з додаванням атрибуту {«адгезія»}.

**Правило 3.5:** Якщо товщина нанесення покриття  $h_{вих}$  є значною (залежить від матеріалу покриття), то додати операцію нанесення підшарку з додаванням атрибуту {«заповнення»}.

**Правило 3.5:** Якщо операція нанесення покриття призначена для поверхневого шару, додати їй атрибут {«поверхня»}.

Четверта група евристичних правил призначена для уточнення параметрів та вимог до технологічних операцій згідно виставлених атрибутів:

**Правило 4.1:** Якщо передбачено нанесення підшарку з присутнім функціональним призначенням {«заповнення»}, провести процедуру визначення  $h_{nid}$  – товщини підшарку.

**Правило 4.2:** Якщо дробострумінні операції задані атрибутами {«адгезія»} та {«очищення»}, внести корекцію часу обробки та об'єднати операції.

**Правило 4.3:** Якщо операції нанесення підшарку мають атрибути {«адгезія»} та {«заповнення»} і при цьому використовують однаковий матеріал, то об'єднати операції та їх атрибути.

**Правило 4.4:** Якщо операції нанесення підшарку мають атрибути {«заповнення»} та {«поверхня»} і при цьому використовують однаковий матеріал, то об'єднати операції та їх атрибути.

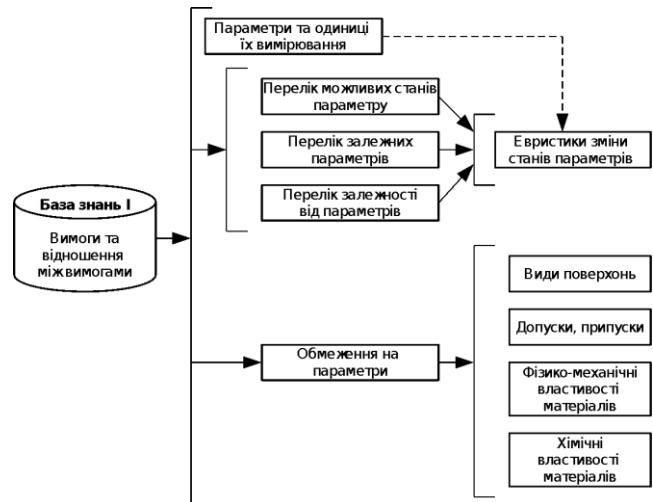
**Правило 4.5:** Якщо операція немає атрибуту, то вилучити її з ланцюга операцій.

### Розробка структури бази знань технологічного процесу

З метою забезпечення інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу автоматизованого планування технологічного процесу є необхідним наповнення баз даних та баз знань. База знань «Вимоги та відношення між вимогами» регламентується таблицями 2 та 3. Відповідно до цих таблиць складена наступна структура бази знань (рис. 3).

Пункт «Параметри та одиниці вимірювання» заповнений за даними наведеними в табл. 3 та 4. Також ці таблиці містять можливі стани. Деякі параметри можуть мати один з кількох станів, якщо мета оптимізації обробки відрізняється. Тому для забезпечення розв'язності поставленої задачі оптимізації, необхідно мати набір необхідних параметрів, або їх допустимі діапазони;

за виконання правильності постанови задачі побудови технологічного процесу відповідає блок «Евристики зміни станів параметрів». Евристики відповідають першій групі переліку евристичних знань в п. 4.



**Рис. 3.** База знань для визначення вхідних даних для забезпечення побудови процесу відновлення поверхні деталі методом електродугового напилення (Fig. 3. Knowledge base for determining the input data to ensure the construction of the process of restoring the surface of the part by the method of electric arc spraying)

«Види поверхонь», «Допуски, припуски» заповнюються на основі табличних даних на наведені в ДСТУ 2391-94, ГОСТ 26645-85, ГОСТ 7505-89, ГОСТ 7062-74, ГОСТ 7829-74. Так само загальна величина допусків повинна відповідати вимогам до якості деталі.

Фізико-механічні властивості матеріалів визначаються за ДСТУ 4219-2003, ДСТУ 2494-94. У випадках відсутності відомостей про матеріал деталі, використовують значення які отримані за методами визначеннями ДСТУ EN 10002-1:2006, ДСТУ EN 10002-5:2006, ГОСТ 1497-84 – випробування металів на розтяг; та інші. Допускається випробування матеріалів на міцність за допомогою каліброваних терпугів або портативними твердомірами.

Сумісність використання контактуючих металів регламентується за ГОСТ 9.005-72 ЕСЗКС, та можливі матеріали покриттів регламентовано ГОСТ 10052-75.

Наступна, друга база знань відповідає за набір евристик, які визначають доцільність технологічних операцій і має наступну структуру (рис. 4):

Блок з даними для повторного використання на схемі рис. 4 показано як базу даних четвертої групи – використання другої бази знань повинне забезпечити систему прив'язки технологічних операцій за їх призначенням в технологічному процесі відновлення поверхонь. Регламентуються ці правила другою групою евристичних правил. На цьому етапі технологічні операції можуть додаватися до ланцюга процесів обробки, набувати атрибутів призначення та може відбуватися закріплення операції як обов'язкової, що запобігає її виключенню на наступних етапах проектування та оптимізації.



Рис. 4. База знань для евристик відбору технологічних операцій за призначенням (Fig. 4. Knowledge base for heuristics of selection of technological operations by purpose)

Наступна третя база знань призначена для вирішення проблеми зв'язку послідовних технологічних операцій за критеріями та параметрами. Є природнім те, що результат попередньої операції впливатиме на результат наступної, тому для технологічного процесу між технологічними операціями є невизначеність в множині параметрів, залежність наступної операції від значення цих параметрів та варіативність отримання характеристик після проміжної технологічної операції. База знань, структуру якої представлено на рис. 5, регламентує зв'язок вхідних та вихідних параметрів технологічного процесу. Також тут міститься інформація про наявні математичні моделі процесів, математичних залежностей між вхідними та вихідними параметрами з обмеженнями на їх значення. Ці знання дозволяють організувати математичну модель оптимізації процесу по заданим критеріям. Однак критерії проміжних операцій впливають на загальні величини, такі як енерговитрати, час роботи, та інші.

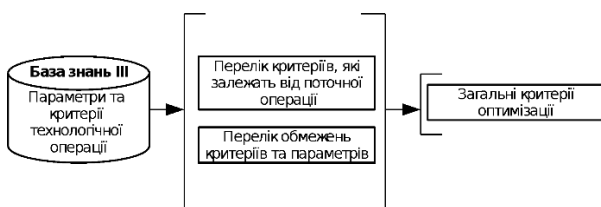


Рис. 5. База знань параметрів та критеріїв технологічної операції (Fig. 5. Knowledge base of parameters and criteria of technological operation)

Остання база знань, яка відноситься до конкретної технологічної операції, позначена як п'ята група, містить математичні моделі, які можуть бути використані для знаходження режимів обробки при яких витрати за оптимізаційними параметрами є мінімальними. З причин варіативної свободи у виборі вхідних параметрів технологічної операції за рахунок варіацій попередніх операцій, інформаційна система має можливість будувати множину допустимих вихідних параметрів, тим самим множина кількості варіантів виконання наступних технологічних операцій, а значить і вільних змінних в процесі оптимізації в цілому, значно збільшується. Тому проведення оптимізації в цілому є задачею на значно більшому просторі ступенів вільності.

Остання, шоста база знань відповідає за збереження четвертої групи евристичних правил. Ці правила дозволяють виключити з процесу не обов'язкові технологічні операції або об'єднати різні за призначенням, але однакові за параметрами технологічні операції в одну. Завдяки використанню структурної оптимізації, співвідношення операцій по призначенню, значно знижується комбінаторна складова технологічного процесу.

### Діаграма використання інформаційної системи забезпечення побудови та оптимізації технологічного процесу електродугового наплення

Розглянуті моделі, структури та бази знань інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу технологічного процесу електродугового наплення повинні поєднуватися в єдину систему, структура якої повинна відповідати сценарію використання системи, її задачам і можливостям. Тобто, сценарій використання повинен відбивати процеси проектування технологічного процесу і відповідати логіці її використання користувачами. Враховувати можливість обслуговування кількох користувачів. Задачу представлення моделі використання системи можна виконати використавши діаграму універсальної мови моделювання UML. Діаграма (рис. 6) містить умовні інтерфейси до інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу забезпечення проектування технологічного процесу з оптимізацією за вказаними параметрами. Із системою повинні взаємодіяти умовні «замовник» та «виконавець».

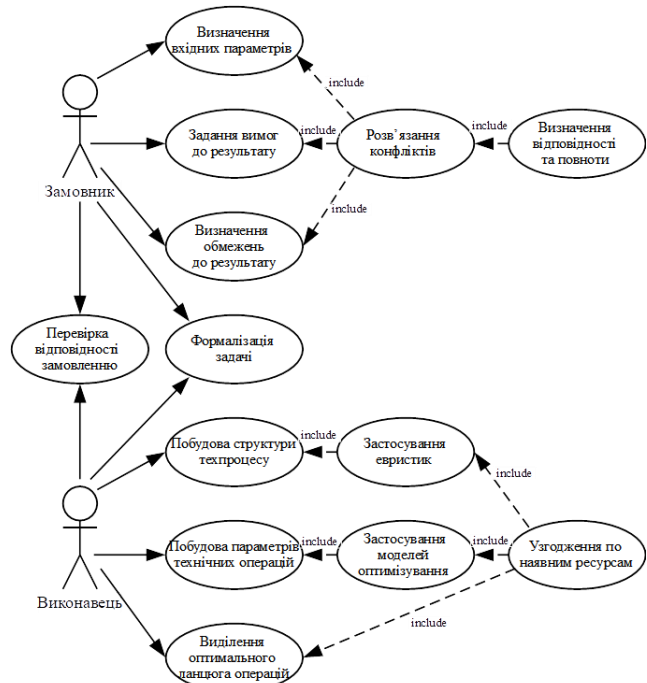


Рис. 6. USE CASE DIAGRAM (прецедентів), структура та взаємодія інтерфейсів інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу проектування та оптимізації технологічного процесу мовою UML (Fig. 6. USE CASE DIAGRAM (precedents), structure and interaction of interfaces of information system of design and optimization of technological process in UML language)

Первинною задачею системи є узгодження взаємодії замовника та виконавця для формалізації задачі. Таке узгодження є необхідним для формалізації задачі створення та оптимізації ланцюга технологічних операцій. До підготовчого етапу відносяться взаємодії із «замовником», при цьому є обов'язковою зворотній зв'язок з «виконавцем», який посередньо інтерфейсів перевірки відповідності та формалізації задачі забезпечує зворотній зв'язок ітераційного уточнення остаточної задачі. Ітерації уточнення проводиться до отримання формалізованої задачі, яка не містить невизначеностей, конфліктів і при цьому повинна гарантуватися наявність критеріїв оптимізації та обмежені на задані та шукані величини. Відповідно парадигмі проектування UML, «замовник» та «виконавець» є ролі які можуть бути представлені однією або кількома особами або колективами. Невизначеність розташування акторів та інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу в загальному випадку виправдовує перенесення інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу у хмарні технології, коли взаємодія системи та акторів може відбуватися роздільно як і по розташуванню так і по часу доступу.

### Висновки

Дослідження, проведені в даній роботі, дозволили провести розробку моделі системи підтримки технологічних процесів з використанням хмарних інформаційних технологій. Отримані такі результати.

1. Було проаналізовано труднощі автоматизації проектування технологічних процесів, пов'язані головним чином з тим, що завдання проектування технологічних процесів не мають в даний час формальних методів вирішення. Тому для здійснення технологічного проектування було проведено розробку формалізації технології (або її частини), тобто провести заміну (перетворення) змістовних пропозицій математичним апаратом. В результаті даною формалізації було запропоновано схему руху інформації в процесі оптимізації технологічного процесу.

2. Було розроблено модель реалізації структури технологічного процесу, для якої було визначено основні входні параметри: перелік параметрів, які впливають на процес; перелік параметрів, які є результатом процесу; перелік керованих параметрів; перелік некерованих параметрів; перелік невідомих параметрів; деталізована структура технологічного процесу з розділенням параметрів та результатів. Також була запропонована структура експертної системи для оптимізації технологічних процесів, проаналізовані методи представлення знань та відповідно розроблено схему потоків інформації під час реалізації даної експертної системи.

3. На основі розглянутих та розроблених методів та механізмів, які використовують для розробки технологічних процесів розроблено структуру інформаційної хмарної системи підтримки прийняття рішень для автоматизації створення оптимізованих технологічних процесів.

4. За допомогою використання розроблених методів та моделей, в результаті проведення процесу оптимізації технологічного процесу за допустимими евристичними правилами, вдається отримати множину ланцюгів окремо оптимізованих технологічних процесів, з якої проводиться багатокритеріальний відбір, що відповідає поставленим вимогам оптимізації. Користувач системи може отримувати у відповідь як і одну картку технологічного процесу, так і декілька найкращих.

5. Розроблені підходи оптимізації технологічних процесів були застосовані до вирішення задачі оптимізації технологічного процесу електродугової обробки. Спочатку було проведено формалізацію технологічного процесу електродугової обробки. Після цього, було проведено формування евристичних правил та бази знань структури технологічного процесу електродугового напилення та відповідно розроблено структури бази знань даного технологічного процесу та діаграма використання розробленої інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. А.А. Смирнов, Т.В. Смирнова, А.Н. Дреев, А.В. Дудан Оптимизация технологического процесса восстановления и упрочнения поверхностей с заданными характеристиками в виде облачного сервиса / Вестник Полоцкого государственного университета. №3 (2020). – с. 50-61.
2. Попов М.Е., Абухарб М. Система поддержка принятия решения при выборе метода упрочняющей обработки деталей машин в интегрированных САПР. Вестник Донского государственного технического университета. 2011;11(3):333-342.
3. Скрипка, К.И. Экспертная система автоматизированного выбора способов восстановления сработанных деталей / К.И. Скрипка, М.А. Зенкин / Вестн. ЖДТУ. Технические науки. – 2004. – № 1 (28). – С. 66–68.
4. Смирнова, Т.В. Формалізація та реалізація структури технологічного процесу електродугового напилення для оптимізаційної експертної системи / Т.В. Смирнова // Технічні науки та технології. – 2020. – № 1 (19). – С. 104-113.
5. Смирнова Т.В. Формування евристичних правил, бази знань та формалізація структури й правил технологічного процесу для оптимізаційної хмарної інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу / Т. Smirnova // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2020. – Т. 2 (60). – С. 101-104. –
6. Смирнова, Т.В., Минайленко, Р. М., Доренський, О. П., Сисоєнко, С. В., Смирнов, С. А. (2021). Хмарна автоматизована система інтелектуальної підтримки прийняття рішень для технологічних процесів. Вісник Черкаського державного технологічного університету, (4), 84–92.
7. Попов М.Е. Основы САПР технологических операций упрочняющей обработки: учеб. пособие / М.Е. Попов; РИСХМ. – Ростов н/Д, 1987. – 91 с.
8. Попов М.Е. Формализованное описание структуры базы данных методов упрочняющей обработки в интегрированных САПР / М.Е. Попов // Вестн. Донск. гос. техн. ун-та. – 2000. – (Проблемы производства машин). – С. 88-91
9. Горелова Г.В. Метод оптимума номинала и его применение / Г.В. Горелова, В.В. Здор, Д.В. Свечарник. – М.: Энергия, 1970. – 200 с.

10. Попов М.Е. Разработка и постановка продукции на производство на основе структурирования функции качества / М.Е. Попов, А.М. Попов // Вестник машиностроения. – 2000. – №7. – С. 52-58.
11. Анфёров М.А. Структурная оптимизация технологических процессов в машиностроении / М.А. Анфёров, С.Г. Селиванов. – Уфа: Гилем, 1996. – 185 с.
12. САПР. Типовые математические модели объектов проектирования в машиностроении: метод. указания. РД 50-464-84. – М.: Стандарты, 1985. – 200 с.
13. Попов М.Е. Интеграция конструкторского и технологического проектирования на основе концепции Concurrent Engineering / М.Е. Попов, А.М. Попов // Вестник машиностроения. – 1998. – №4. – С. 41-45.
14. Вереск, О.М. Технологии поддержки принятия решений / О.М. Вереск. – Львов: Изд-во Львов. политехники, 2013.
15. Хох, В.Д. Исследование методов построения экспертных систем / В.Д. Хох, Е.В. Мелешко, М.С. Якименко // Системы управления, навигации и связи. – 2016. – Вып. 4(40). – С. 48–52.
16. Лимаренко, В.В. Информационная система поддержки решений для автоматизации создания технологических процессов механообработки деталей высокоточного оборудования: дис. канд. ... техн. наук / В.В. Лимаренко. – Харьков, 2019.

## REFERENCES

1. A.A. Smirnov, T.V. Smirnova, A.N. Dreev, A.V. Dudan Optimizaciya tekhnologicheskogo processa vosstanovleniya i uprochneniya poverkhnostej s zadannymi kharakteristikami v vide oblachnogo servisa / Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. №3 (2020). – s. 50-61.
2. Popov M.E., Abukharb M. Sistema podderzhka prinyatiya resheniya pri vybore metoda uprochnyayushchej obrabotki detalej mashin v integrirovannykh SAPR. Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2011;11(3):333-342.
3. Skripka, K.I. Ekhspertnaya sistema avtomatizirovannogo vybora sposobov vosstanovleniya srobotannykh detalej / K.I. Skripka, M.A. Zenkin / Vestn. ZHDTU. Tekhnicheskie nauki. – 2004. – № 1 (28). – S. 66–68.
4. Smirnova, T.V. Formalizaciya ta realizaciya strukturi tekhnologichnogo procesu elektrodugovogo napilennya dlya optimizacijnoi ekspertnoi sistemi / T.V. Smirnova // Tekhnichni nauki ta tekhnologii. – 2020. – № 1 (19). – S. 104-113.
5. Smirnova T.V. Formuvannya evristichnikh pravil, bazi znan' ta formalizaciya strukturi j pravil tekhnologichnogo procesu dlya optimizacijnoi khmarnoi informacijnoi sistemi / T. Smirnova // Sistemi upravlinnya, navigacii ta zv'yazku. Zbirknik naukovikh prac'. – Poltava: PNTU, 2020. – Т. 2 (60). – S. 101-104. –
6. Smirnova, T.V., Minajlenko, R. M., Dorens'kij, O. P., Sisoenko, S. V., Smirnov, S. A. (2021). Khmarna avtomatizovana sistema intelektual'noi pidtrimki priynyattya rishen' dlya tekhnologichnikh procesiv. Visnik Cherkas'kogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu, (4), 84–92.
7. Popov M.E. Osnovy SAPR tekhnologicheskikh operacij uprochnyayushchej obrabotki: ucheb. posobie / M.E. Popov; RISKHM. – Rostov n/D, 1987. – 91 s.
8. Popov M.E. Formalizovannoe opisanie struktury bazy dannykh metodov uprochnyayushchej obrabotki v integrirovannykh SAPR / M.E. Popov // Vestn. Donsk. gos. tekhn. un-ta. – 2000. – (Problemy proizvodst-va mashin). – S. 88-91
9. Gorelova G.V. Metod optimuma nominala i ego primenenie / G.V. Gorelova, V.V. Zdor, D.V. Svecharnik. – М.: Ehnergiya, 1970. – 200 s.
10. Popov M.E. Razrabotka i postanovka produkcii na proizvodstvo na osnove strukturirovaniya funkcii kachestva / M.E. Popov, A.M. Popov // Vestnik mashinostroeniya. – 2000. – №7. – S. 52-58.
11. Anfyorov M.A. Strukturnaya optimizaciya tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii / M.A. Anfyorov, S.G. Selivanov. – Ufa: Gilem, 1996. – 185 s.
12. SAPR. Tipovye matematicheskie modeli ob'ektov proektirovaniya v mashinostroenii: metod. uka-zaniya. RD 50-464-84. – М.: Standarty, 1985. – 200 s.
13. Popov M.E. Integraciya konstruktorskogo i tekhnologicheskogo proektirovaniya na osnove koncepcii Concurrent Engineering / M.E. Popov, A.M. Popov // Vestnik mashinostroeniya. – 1998. – №4. – S. 41-45.
14. Veresk, O.M. Tekhnologii podderzhki prinyatiya reshenij / O.M. Veresk. – L'vov: Izd-vo L'vov. politekhniki, 2013.
15. Khokh, V.D. Issledovanie metodov postroeniya ehkspertnykh sistem / V.D. Khokh, E.V. Meleshko, M.S. Yakimenko //Sistemy upravleniya, navigacii i svyazi. – 2016. – Vyp. 4(40). – S. 48–52.
16. Limarenko, V.V. Informacionnaya sistema podderzhki reshenij dlya avtomatizacii sozdaniya tekhnologicheskikh processov mekhanooobrabotki detalej vysokotochnogo oborudovaniya: dis. kand. tekhn. nauk / V.V. Limarenko. – Khar'kov, 2019.

Received (Надійшла) 30.07.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.10.2021

## ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Смірнова Тетяна Віталіївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

**Tetiana Smirnova** – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of cybersecurity and software academic department, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine;  
e-mail: [sm.tetyana@gmail.com](mailto:sm.tetyana@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6896-0612>

**Буравченко Костянтин Олегович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

**Kostiantyn Buravchenko** – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of cybersecurity and software academic department, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine;  
e-mail: [buravchenkok@gmail.com](mailto:buravchenkok@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6195-7533>

**Кравченко Сергій Сергійович** – аспірант, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

**Serhii Kravchenko** – PhD graduate student, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine;  
e-mail: [krava96ch@ukr.net](mailto:krava96ch@ukr.net); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8730-9534>

**Горбов Віталій Олегович** – аспірант, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;  
**Vitalii Horbov** – PhD graduate student, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine;  
e-mail: [angry.beaver1125@gmail.com](mailto:angry.beaver1125@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7551-2567>

**Смірнов Олексій Анатолійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;  
**Oleksii Smirnov** – doctor of technical sciences, professor, head of cybersecurity and software academic department, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine;  
e-mail: [dr.SmirnovOA@gmail.com](mailto:dr.SmirnovOA@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9543-874X>

### **Облачная система поддержки принятия решений технологического процесса восстановления поверхностей конструкций и деталей машин**

Т. В. Смирнова, К. О. Буравченко, С. С. Кравченко, В. О. Горбов, А. А. Смирнов

**Аннотация.** Объектом исследования является процесс поддержки принятия решений технологического процесса. Предметом исследования является система поддержки принятия решений технологического процесса восстановления поверхностей конструкций и деталей машин в виде облачного сервиса. Цель работы заключается в разработке системы поддержки принятия решений технологического процесса восстановления поверхностей конструкций и деталей машин в виде облачного сервиса, что позволит в дальнейшем оптимизировать высокотехнологичные процессы предприятий разного масштаба по использованию облачных информационных технологий. В результате исследования проанализированы трудности автоматизации проектирования технологических процессов, связанные главным образом с тем, что задачи проектирования технологических процессов не имеют в настоящее время формальных методов решения. Поэтому для осуществления технологического проектирования проведена разработка формализации технологии (или ее части), то есть проведена замена (преобразования) содержательных предложений математическим аппаратом. В результате данной формализации предложена схема движения информации в процессе оптимизации технологического процесса. разработана модель реализации структуры технологического процесса, для которой определены основные входные параметры: перечень параметров, которые влияют на процесс. Также была предложена структура экспертной системы для оптимизации технологических процессов, проанализированы методы представления знаний и соответственно разработана схема потоков информации при реализации данной экспертной системы. На основе рассмотренных и разработанных методов и механизмов, используемых для разработки технологических процессов разработана структура информационной облачной системы поддержки принятия решений для автоматизации создания оптимизированных технологических процессов. С помощью использования разработанных методов и моделей, в результате проведения процесса оптимизации технологического процесса по допустимым эвристическим правилам, удалось получить множество цепей отдельно оптимизированных технологических процессов, с которой проводится многокритериальный отбор, соответствует предъявляемым требованиям оптимизации. Пользователь системы может получать в ответ как одну карточку технологического процесса, так и несколько лучших. **Выводы.** Разработанные подходы оптимизации технологических процессов были применены к решению задачи оптимизации технологического процесса электродуговой обработки. Сначала проведено формализацию технологического процесса электродуговой обработки. После этого, проведено формирование эвристических правил и базы знаний структуры технологического процесса электродуговой напыления и соответственно разработаны структуры базы знаний данного технологического процесса и диаграммы двумя использования разработанной информационной системы в виде облачного сервиса.

**Ключевые слова:** система поддержки принятия решений; технологические процессы; облачные сервисы.

### **Cloud system for decision supporting of technological process of restoration of surfaces of structures and machine parts**

Tetiana Smirnova, Kostiantyn Buravchenko, Serhii Kravchenko, Vitalii Horbov, Oleksii Smirnov

**Abstract.** The object of research is the process of decision support of the technological process. The subject of the research is the decision support system of the technological process of restoration of surfaces of structures and machine parts in the form of cloud service. The purpose of the work is to develop a decision support system for the technological process of restoration of surfaces of structures and machine parts in the form of cloud service, which will further optimize high-tech processes of enterprises of various scales using cloud information technology. As a result of the research, the difficulties of automating the design of technological processes are analyzed, mainly due to the fact that the tasks of technological process design do not currently have formal methods of solution. Therefore, for the implementation of technological design, the development of formalization of technology (or part of it), ie the replacement (transformation) of meaningful proposals by the mathematical apparatus. As a result of this formalization, a scheme of information flow in the process of process optimization is proposed. the model of realization of structure of technological process for which the basic input parameters are defined is developed: the list of parameters influencing process. The structure of the expert system for optimization of technological processes was also proposed, the methods of knowledge presentation were analyzed and the scheme of information flows during the implementation of this expert system was developed accordingly. Based on the considered and developed methods and mechanisms used for the development of technological processes, the structure of the information cloud decision support system for automation of the creation of optimized technological processes has been developed. Using the developed methods and models, as a result of the process of process optimization according to acceptable heuristic rules, it was possible to obtain a set of chains of separately optimized technological processes, from which multicriteria selection that meets the optimization requirements. The user of the system can receive in return both one card of technological process, and some best. **Conclusions.** The developed approaches to the optimization of technological processes were applied to solve the problem of optimization of the technological process of electric arc processing. First, the technological process of electric arc processing was formalized. After that, the formation of heuristic rules and knowledge base of the structure of the technological process of electric arc spraying and accordingly developed the structure of the knowledge base of this technological process and a diagram of the use of the developed information system in the form of cloud service.

**Keywords:** decision support system; technological processes; cloud services.



# Intelligent information systems

UDC 621.396

DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.13>

Vladyslav Diachenko, Oleksii Liashenko, Oleg Mikhal, Mariia Umanets

Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

## INTELLIGENT APPROACHES TO ORGANIZING REMOTE QUALITY CONTROL OF STORAGE OF GRAIN PRODUCTS

**Abstract.** Cereals are an essential part of the diet of Homo sapiens. Since late Neolithic times, with the transition to sedentary farming, working with grain (growing, storing, processing, cooking food) has become a traditional type of professional human activity. As part of the accumulated historical experience, numerous technological processes have been developed and optimized for this type of activity. The relevant technologies evolved in close correlation with the changing conditions of life, literally under the pressure of Darwinian natural selection, because they were directly related to the survival of the Homo sapiens. Further development of grain-processing technologies remains invariably urgent today, as evidenced by the report [1] presented by the UN on the state of food security and nutrition in the world - with horrifying figures depicting the need and misery of the wide masses of the population of the planet. An important component of grain processing is the technology associated with the storage of grain products. Part of the stored grain products is used as seed stock for a new cycle of grain sales, the other - a significant part - for processing into food products. At the same time, new developed (optimized, improved) grain storage technologies must be safe, low-cost, maximally compatible with previously developed (available) equipment, and scalable to large volumes of stored material. Of course, the technology must ensure proper efficiency, an indicator of which should be a reduction in the percentage of grain product losses. In this regard, management methods used in the technological processes of grain products storage are substantially important, as well as methods of control over the current state of grain products for the correct organization of the technological processes. In particular, methods using elements of artificial intelligence are of high interest. Among them, neural networks are promising, especially those capable of learning "without a teacher" - Kohonen Maps (KK). Modified KK algorithm [2] implements reduced learning time[3], which is relevant in the implementation of adaptive procedures for processing the results of measurements of controlled parameters. The purpose of this paper is to consider the principles of using modified Kohonen maps to classify situations with applicability to remote quality control of grain products storage.

**Keywords:** Grain; Kohonen Maps; Conditions Identification System; Energy Saving.

### Introduction

Briefly consider the elements of the subject area - methodology, equipment and storage conditions of grain products - in relation to the formulation of a general model representation for the organization of quality control systems of grain products storage.

At the moment, the main type of granaries are tower-type structures. They are built with the same standardized shape and unified design. The convenience of this approach is that the project - a typical and done once. Also the technology of erection is typical. No new technical technological solutions are required every time. The equipment that each tower is equipped with is also typical, i.e. it is produced in series and therefore has an increased repairability, interchangeability and completeness of spare parts. In the end, all this makes construction and subsequent operation cheaper.

Grain storage (towers) are built in groups of, for example, 6-8 structures. Grouping simplifies the construction process, including planning, financing, land acquisition (legal issues), supplying electricity to one site, providing roads to bring materials. Also, the deployment of labor (builders) for the construction of the complex, etc. is solved once.

Grouping facilitates the process of further *organizational and technical* operation of the complex, including: protection of the territory, maintenance of electrical power supply equipment, regulatory maintenance and running repairs of equipment and

machinery, etc. Grouping of granaries (towers) into complexes solves (simplifies) also many issues of the following *target* operation of granaries: delivery - pre-processing - storage - export of grain, organization of control of the stored grain material, preventive and remedial measures to maintain the stored material in condition, etc.

In organizational-operational terms, in the aspect of *digitalization* of the operation process (implementation and maintenance of appropriate software), including the drafting of this sketch model, the grouping of individual granaries (towers) is convenient as follows.

1. Erection of granaries (towers) is carried out simultaneously or in close time. This is due to the need to concentrate labor and construction equipment. But at the same time, the towers themselves and all the equipment are in approximately the same state of readiness (operational deterioration). The component equipment of the towers is also delivered and installed simultaneously or at close dates and mostly by the same specialists (builders, installers of equipment). Therefore, it is just as uniform and equally worn.

2. The area of placement of granaries is usually compact, because it is associated with problems of land acquisition, economical use of resources, etc., including the protection of the territory. Therefore, individual granary towers are not far from each other. Therefore, we can assume that all buildings are in the same natural environment: illumination (heating) by the sun, blowing

(cooling) by winds, exposure to precipitation, the risk of power supply failures due to natural disasters, etc.

3. In the process of *target* operation (actually, work with grain), the entire granary complex in terms of organization and in terms of software (computer support), can be under unified management. Hence, we can speak of the unity (identity) of the approaches to the problem of grain storage for each tower.

In view of the above-mentioned, when compiling the model, it is possible (perhaps with certain reservations) to speak about the *identity* of granaries (towers) and the *equivalence* (similarity) of the condition and storage conditions of grain in them.

**Quality model description**

Creating a model involves formalizing the description. The basis of formalization can be configuration concepts of the modelled object, the characteristics of the object itself, as well as external influencing factors. According to the totality of these attributes of the description, the processes occurring in the object are considered (studied, conceptually assumed). It is assumed that the model should take into account (describe, cover) the course (mutual influence) of these processes, taking into account the interaction of

configuration and external influencing factors (Fig. 1).

The purpose of the model is to organize and consolidate knowledge about the object, also (ideally) to implement predictive and instructive functions.

*Knowledge Arrangement.* It should be based on the incompleteness of the available information about the object. A model (the existence of a model) implies the possibility of replenishing, supplementing and modifying knowledge (perceptions) about the object being modeled. The model should be adaptable (configurable, reconfigurable, adjustable) in relation to the object, and ideally learning and self-learning.

*Predictive functions.* With the use of the model, it should be possible to describe the behavior of the object (the course of processes in the object) in some (defined, specified) future.

*Instructional Function.* With the use of predictive functions (foresight functions) of the model, it should be possible to produce recommendations to actively change the processes taking place, in order to maintain the simulated object in a particular defined state. We are talking about using the model as the basis for an expert system (decision support system) to control the object. Consider the following factors affecting the organization of remote control (Fig. 2).

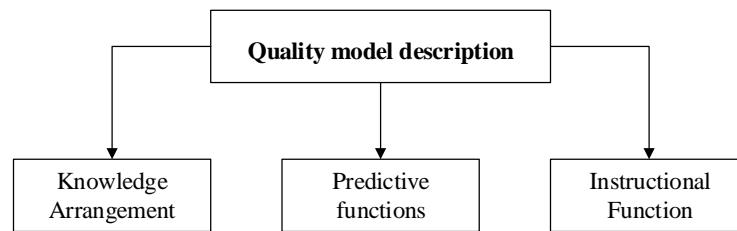


Fig. 1. Quality model description

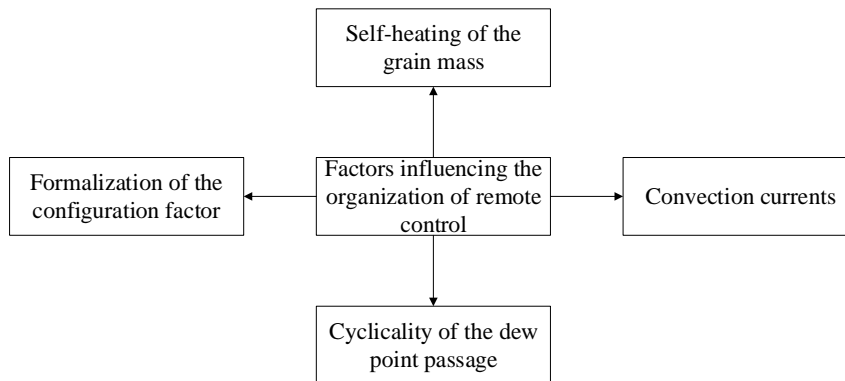


Fig. 2. Factors influencing the organization of remote control

These include: formalization of the configuration factor, self-heating of the grain mass, convection currents, cyclicity of the dew point passage.

**Formalization of the configuration factor**

The currently accepted (widespread) form of building a granary is a straight circular cylinder. Filling and extraction of grain material is done from above, in the direction of the cylinder axis. The construction advantage of this solution is the minimum material cost: the maximum volume for a given amount of used building material (sheet metal). The technological

advantage is the use of sheet material (metal sheet), bent along the cylindrical formation. Of course, geometrically, the spherical shape of the granary would be even more profitable in terms of material/volume ratio. Sphere - limits the maximum volume for a given fixed surface area. But the *non-planarity* (non-reducibility to a flat sheet material) of the structural elements - sphere segments - significantly increases the cost of such a design solution.

The operational advantage of the cylindrical shape of the granary is the absence of corners (axisymmetry). This ensures uniform distribution of stored material

(grain) in all directions during axial loading (backfilling). Consequently, there are no "special places" that create difficulties in the removal of stored material (grain).

Since the shape of the tower is a straight circular cylinder, it is natural to use a cylindrical coordinate system to describe the inner volume:  $(H, R, \alpha)$  - height, radius, angle of rotation of the plane  $(H, R)$ . It is reasonable to consider (in a model approximation) the product storage conditions in the storage volume as axisymmetric. According to the conditions of filling the product in the storage, there is no fundamental reason to single out any of the directions in terms of  $\alpha$  angle. In this regard, in the future, only two parameters can be used in the model to indicate a point of space inside the volume:  $(H, R)$  - height and radius. The two-parameter description  $(H, R)$  means that the layout (filling) of the material (grain) inside the storage can be characterized by two factors: layering (belonging to some layer along the height of the cylinder) and the radius distance from the central axis. This means that some point (a small volume of stored product or a place where the  $i$ -th sensor of the measuring equipment system can be placed) is characterized by a pair of coordinates  $(h_i, r_i)$  according to its location inside the cylinder.

This also means that various sensors located in different places in the thickness of the stored product and generally control the state of the product through the volume of the storage, within the model can be correlated with the coordinates on the plane  $(H, R)$ , and with a quarter of the plane with positive values of the coordinates:  $h_i \in (0, H_0)$ ,  $r_i \in (0, R_0)$ , where  $H_0$  and  $R_0$  are the height and half-diameter of the storage tower, respectively.

Besides, in view of initially assumed (postulated within the model) identity of towers and identity of grain storage conditions in them (see above), coordinates of sensors in all granaries of this group of towers can be correlated with the same model plane  $(H, R)$ .

### Cyclicity of the dew point passage

The most important factors influencing the stored grain product and, accordingly, the factors characterizing the state of the stored grain product are temperature  $T$  and humidity  $P$ . The complexity consists in the fact that these factors are interrelated and significantly produced by the external environment.

There is some  $H_2O$  in the air all the time. The air can be "wet" or "dry". There is a limit value for the concentration of  $H_2O$  in the air for a given temperature value. When this concentration is exceeded,  $H_2O$  is released from the air in the form of fog or dew fall. There is a concept of "dew point" - the temperature  $t_0$  at which some concentration  $p_0$  of  $H_2O$  in the air is the limit. When  $p_0$  is fixed, at  $t < t_0$  the dew falls out - excess moisture is released from the air and settles on objects. At  $t > t_0$  the dew dries out - is absorbed by the air. The process looks like it is reversible. But in the case of loose substances, including grain in the granary, the reversibility is not complete. The dew that falls at  $t < t_0$  is partially absorbed by the grain. Consequently, at  $t > t_0$ , moisture enters the air mass inside the granary

(absorbed by the air inside the granary) partially from outside, from the external atmospheric air, from the environment. Result: With cyclic temperature changes around the dew point, the grain mass accumulates moisture. This phenomenon is really observed. The cyclicity of temperature changes is ensured by the change of day and night, and the presence of excess moisture in the outer atmospheric air by meteorological phenomena and seasonal climatic changes, ("rainy weather"). At the same time, the humidity of the grain mass increases (accumulates). Exceeding the permissible norms has a negative impact on the quality of the stored product.

### Convection currents

Another important factor (feature) of grain storage is the emergence of convection currents. Due to the radial temperature gradient of the grain mass, convergent and divergent air flows through the grain mass take place (automatically occur)[4]. The formation and directionality of air currents is determined by seasonality. Grain is usually stored in the late summer to early fall season. Grain storage is done in fast time. Therefore, initially the temperature of the grain mass over the volume of the granary is homogeneous. Then, during storage, the temperature change goes from the periphery to the center.

When cold weather arrives, the walls of the granary are cooled. First, the peripheral part of the grain mass is cooled - along the walls of the cylinder. Then the temperature decrease gradually spreads to the center - to the axis of the cylinder. In general, the average temperature of the grain mass (all the grain in the storage) - decreases. But the central (axial) part of the stored cools down more slowly. The result - the emergence of convection heat air flows inside the grain mass. Cold air flows down into the area along the walls of the cylinder; warm air rises up along the axis of the cylinder. The volume is confined and closed, so the flows are closed. The warm air comes in contact with the dome of the granary, cools and flows down into the area along the walls of the cylinder etc. Warm air along the central axial direction carries moisture to the upper layers. There the air is cooled, the moisture condenses, and the upper layers are humidified. Thus, in the upper part of the granary a zone of high humidity of the stored product is formed.

Further, during warming, the grain mass is heated from the periphery to the center. In this case, the direction of the general convection flow (circulation of the air mass through the thickness of the stored product) is inverted. The upward convection warm air flow at the walls of the storage is generated. The central axial flow inside the grain mass is cooler and directed downward. The average temperature of the grain mass slowly rises. But the cold air along the central axial flow transports moisture to the lower layers. There, the moisture condenses, and the lower layers become moist. In this case, now in the lower part of the granary is formed zone of increased humidity of the stored product.

Additionally, the seasonal processes of the formation of convective air currents are superimposed

on the diurnal processes of temperature fluctuations near the "dew point". The result is a layered structure in the distribution of moisture in the grain mass.

### Self-heating of the grain mass

Another point related to grain storage is self-heating of grain [5]. Grain (each grain individually) is a biological object. Consequently, metabolic processes inherent to the entire living environment take place in grains. Metabolism is activated under some (not always reliably diagnosed) combination of temperature and humidity factors. The process initially develops slowly, but then goes at an increasing rate, about 0.05 °C / day. The result is self-heating of the thickness of the grain mass up to +35°C. Thus, the effect of self-heating can be commensurate in importance with the effects of external (seasonal and daily) temperature and humidity influencing factors.

### Conceptual view of the dependencies

#### T(h, r) and P(h, r)

Daily and seasonal temperature-humidity changes with the imposition of self-heating mode of grain mass create a complex time-varying pattern of temperature and humidity distribution, in the thickness of the grain mass. Within the axisymmetric model under consideration, the description of the current state is reduced to a pair of surfaces - graphs of dependencies on two variables: T(h, r) and P(h, r).

In qualitative terms, the temperature dependences T(h, r) look like planes of complex shape with decreasing in the radial direction from the axis to the cylinder form. In the case of predominance of the seasonal component of temperature changes - the surface looks monotonically along the axis H (along the height of the cylinder). When the component related to self-heating dominates, a smoothly decreasing maximum is localized near the H-axis (i.e., a local heating area is seen in the center of the mass volume of the stored product).

The moisture dependences P(h, r), in qualitative terms, look the same with a smooth decrease in the radial direction (from the axis to the cylinder walls), but less uniform in the height of the cylinder (along the axis H). This is due to the preferential axial centering of the moistening area of the product and the above described transfer of the moistening area in accordance with the seasonal and diurnal temperature changes near the "dew point". The result is a "wave" on the surface P(h, r) at the top during the seasonal temperature drop; and a similar "wave" at the bottom during the seasonal storage temperature rise phase.

The specific type of surface graphs is determined by the specific initial conditions: it depends both on the geometrical parameters of a particular granary and on the storage object and the adopted storage mode. In addition, the specific phase of storage is essential. Grain mass, of course, "shows different behavior" immediately after filling, after some time, when the internal temperature-humidity balance is established, or at the end of the storage period, with already formed and possibly shifted areas of local moisture and (or)

warming. Moreover, under certain external (atmospheric) temperature-humidity conditions, the factors of self-heating and the area of local humidification can mutually influence and, accordingly, deform (modify) the configuration of the graph surfaces T(h, r) and P(h, r). As follows from the consideration, the dependences T(h, r) and P(h, r), taken separately, mostly do not characterize the overall picture of grain storage. But T(h, r) and P(h, r) together can be more unambiguous in interpretation and can be applied to adjusting, calibrating, and training models up to the realization of predictive and recommender functions.

For the qualitative construction of the profiles T(h, r) and P(h, r) actually corresponding to specific situations of grain storage, there are (by now accumulated) extensive data, because, as noted, grain handling techniques have been an essential element of traditional common human culture since the late Neolithic. At the same time, technology and equipment are constantly being improved, in this regard, applied research is constantly carried out. As a result, in relation to the considered cylindrical tower-type granaries, there are generalized qualitative ideas about the nature of the distribution of values of key parameters. On a constant basis systems of sensors are used, which are located in the thickness of the grain layer. Thus, in the system described in [5], a bundle of 6 sensors in the vertical direction with a spacing of 5 m is used in 30-meter tower-type storages.

Sensors allow current control of distribution profiles T(h, r) and P(h, r). And the totality of the results for the whole cycle of product storage is an objective time profile of the whole storage process.

Thus, with respect to the developed model, in principle, a set of distribution profiles T(h, r) and P(h, r) can be obtained, which can be used for calibration, training or learning (depending on the direction of development) of the software part of the system.

### Modified Kohonen Maps

The model described at the qualitative level allows us to follow the development of the situation up to the prediction of possible next states and decision making. It is of interest to study the elements of the intellectual part of the system - prediction of the situation development and decision making. To achieve this, it is necessary to propose (consider) options for organizing the actual remote control in terms of processing algorithms, i.e., consider possible adaptive procedures for information processing.

The situation under consideration is quite complex. The data are known in fragments. In particular, only individual irregularly located points are available for the construction of surfaces. It can be about approximation, probabilistic interpretation, a problem like pattern recognition, identification of situations. An acceptable variant of the solution is the Kohonen maps. Moreover, the modified version [2, 3] is interesting, as it is more economical in calculations.

This version of the neural network is based on the principle of "learning without a teacher".

The network is trained to identify elements (states)

by evaluating the degree of proximity or finding differences between them. After a period of training, the network will be able to classify states and assign a particular realization to one of its distinguishable classes.

The presented implementation can be a set of parameter values, and the recognized class can be a recommended solution variant for a given set of parameters.

The main advantage of this toolkit is the ability to significantly reduce the dimensionality of the system.

The input set of parameters can be multidimensional, and the chosen solution can be one of a linear series of values.

### Three-level conditions identification system

In the subject area under consideration - observation and making decisions on the process of grain storage - at least three levels of informativeness of observation of states can be distinguished. Each of the levels is characterized by its structure and importance for decision-making (Fig. 3).

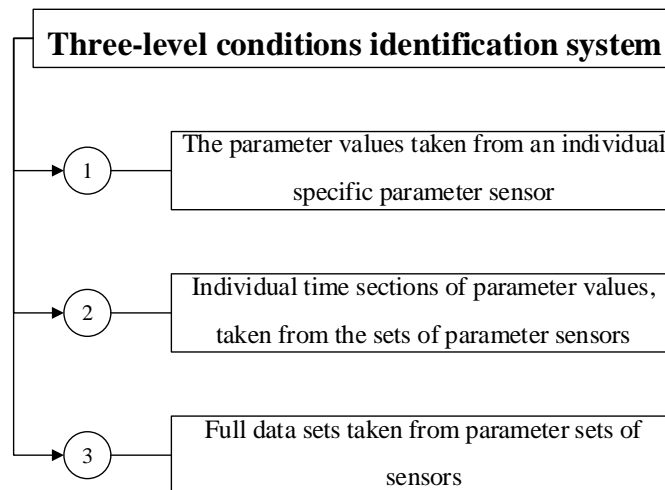


Fig. 3. Three-level conditions identification system

*The first level* is the parameter values taken from an individual specific parameter sensor. Grain storage assumes that there are sets of parameter sensors T and P. Each of the sensors gives out individual values of parameters in the corresponding point of the volume of the granary. Information from this individual sensor - by itself - is not very informative to describe the state of the granary. But it is interesting for evaluation of individual features of the sensor. A sharp difference between the readings of this sensor and the others suggests sensor failure. Further it can be excluded from consideration. A slight systematic difference in the sensor readings from several neighboring sensors may indicate a calibration failure. A correction for such a sensor can be introduced in the future. Of course, there should not be too many sensors that are out of calibration and/or out of order, and this should be certified for a given sensor system before the grain store is loaded.

*The second level* - individual time sections of parameter values, taken from the sets of parameter sensors. We are talking about synchronously taken data sets over the entire granary. The time sections give a view of the current state. This view may not be very informative from the point of view of long-term storage. But this view can be important in extreme cases. Example. A sudden, localized increase in humidity at the top of a grain store can be a signal that the roof is leaking and needs to be repaired urgently.

*The third level* is full data sets taken from parameter sets of sensors. Change of values of

parameters T and P occurs in time. The set of time sections gives a picture of gradation of states for a certain period of time, i.e. demonstrates the dynamics of change of states. This information is complete and comprehensive for a given cycle of grain storage, from loading to unloading. It can reflect, in particular, the entire cyclicity of the emergence and movement of local areas of grain moisture. It can also be used to trace and independently assess the conditionality of grain - compliance with the required standards throughout the storage cycle. But most importantly, this information of the third level is a complete protocol of this storage cycle, which is valuable in the aspect of accumulation of experience for subsequent storage cycles.

### Discussion

1. Obviously, there is a theoretical-multiple relation of nesting between the information sets of these three levels of awareness. The second level is the time sections of the third level, and the first level is the section of the second level by individual sensors. Thus, all information must be captured, and the level of its subsequent processing is a matter of processing procedure. I.e., the division into three levels is just a methodological approach for singling out the individual components of the processing of the total unified array of information, convenient in the plan of analysis of the organization of the structure of subsequent processing.

2. For each of the three levels of awareness considered, a separate processing procedure can be performed using the Kohonen map toolkit [2]. For this

purpose, a training sample can be organized for each of the levels, on which the neural network will be trained. Certainly, for these three levels, each next level works with sample volumes at least an order of magnitude larger than the previous one. Accordingly, the volumes of training samples and the times (duration of procedures) of training must differ by at least two orders of magnitude.

3. Another option (perhaps more interesting) is to use the "output product" of each next level as "input data" for the next. Example. Individual numerical values - individual sensor readings on the first level can be recognized as "normal", "dangerous" or "critically dangerous". Individual combinations of sensor readings taken from the first level results can be evaluated at the second level as "normal", "moisture formation from above", "...in the center", etc. Similarly, separate combinations of indicators taken from the identified situations of the second level can be recognized on the third level as "movement of moistening area upwards", "...downwards", "expansion of moistening area", "reduction...", etc. Probably, in this case the volumes of training samples and training procedures will be correspondingly reduced. But perhaps the whole procedure for building such a system will become more complicated, due to the introduction of interconnections between the relatively autonomous procedures of the first, second and third levels separately.

4. The above (items 2 and 3) refers only to the procedures of using the Kohonen Maps toolkit, which provides pattern recognition and state identification. Recommendations on decision-making are the competence of specialists in the applied field - grain

storage. Therefore, transforming the work of the Kohonen map toolkit into meaningful recommendations - the development and operation of an appropriate expert system may be a subject for separate consideration.

5. The fourth level of information - generalization (consolidation) of information of the third level - combining the experience of several consecutive cycles (several years) of using the granary of this type was outlined above, but not specified. This fourth level may include (take into account) the effect of wear and tear of individual elements of granary equipment, individual facts of repair and modernization of equipment, individual facts of violation of the mode of operation, etc. The "output product" of this fourth level of awareness can be the development of recommendations for the modernization of equipment and methods of organizing the storage of grain material.

### Conclusion

1. A schematic qualitative description of the typical stages and basic processes of grain products storage is presented.

2. A variant of formalization of the model for the two-parameter case of information description of the state of the stored grain product is considered.

3. The concept of a model three-level system of organization of information processes in relation to the remote quality control of the preservation of grain products is considered.

4. The variants of realization of basic elements of information quality control of grain products storage were discussed.

### REFERENCES

1. FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. 2020 Summary. The State of Food Security and Nutrition in the World 2020. Transforming food systems for affordable healthy diets. Rome, FAO. URL: <http://surl.li/asecn>
2. Diachenko V.A., Mikhal O.F. Adaptive parallel learning of modified self-organizing Kohonen map. *Modern strains of development of information and communication technologies and control devices: Matters of the Second International Scientific and Technical Conference*. P. 43-44.
3. Diachenko V.A., Mikhal O.F. Intellectual aspect of learning modified self-organizing Kohonen maps. *Intelligence Bionics: scientific: technical journal*. Kh. KhNURE, 2015. Vol. 2 (85). P. 35-40.
4. Basic provisions for the management of grain preservation processes. URL: <https://hipzmag.com/tehnologii/hranenie/osnovnye-polozeniya-upravleniya-protsessami-sohrannosti-zerna/>
5. Automatic system for predicting self-heating (asps) of grain crops during storage in elevator silos. URL: <https://hipzmag.com/tehnologii/hranenie/avtomaticheskaya-sistema-prognozirovaniya-samosogrevaniya-asps-zernovyh-kultur-pri-hranenii-v-silosah-elevatora/>

Received (Надійшла) 19.08.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.11.2020

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Дяченко Владислав Олександрович** – старший викладач кафедри Електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Vladyslav Diachenko** – senior lecturer, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [vladyslav.diachenko@nure.ua](mailto:vladyslav.diachenko@nure.ua); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2725-8784> .

**Ляшенко Олексій Сергійович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Oleksii Liashenko** – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [oleksii.liashenko@nure.ua](mailto:oleksii.liashenko@nure.ua); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0146-3934> .

**Міхаль Олег Пилипович** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри Електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Oleg Mikhail** – doctor of technical sciences, associate professor, professor, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [oleg.mikhail@gmail.com](mailto:oleg.mikhail@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5977-3177>.

**Уманець Марія Станіславівна** – студентка, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;  
**Mariia Umanets** – student, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [mariia.umanets@nure.ua](mailto:mariia.umanets@nure.ua); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4459-2346>.

### Інтелектуальні підходи до організації видаленого контролю якості зберігання зернових продуктів

В. О. Дяченко, О. С. Ляшенко, О. П. Міхаль, М. С. Уманець

**Анотація.** Зернові - значна частина поживного раціону типу *Homo sapiens*. З часів пізнього неоліту, з переходом на осіле землеробство, робота із зерном (вирощування, зберігання, переробка, приготування харчових продуктів) стала традиційним видом професійної людської діяльності. В рамках накопиченого історичного досвіду, за цим видом діяльності було розроблено та оптимізовано численні технологічні процеси. Відповідні технології розвивалися у зв'язку зі зміною життєвих потреб, буквально під тиском Дарвінівського природного відбору, оскільки були безпосередньо пов'язані з виживанням виду *Homo sapiens*. Подальший розвиток технологій зернообробки залишається незмінно актуальним і донині, на підтвердження чого – доповідь [1], подана ООН, про стан продовольчої безпеки та харчування у світі – з жахливими цифрами, що зображують потребу та лиха широких народних мас населення планети. Важливою складовою зернообробки є технології, пов'язані із зберіганням зернопродуктів. Частина зернопродуктів, що зберігаються, використовується як насіннєвий фонд для нового циклу реалізації зернозабезпечення, інша – істотна – для переробки в харчові продукти. При цьому нові технології зернозберігання, що розробляються (оптимізуються, удосконалюються), повинні бути безпечними, маловитратними, максимально сумісними з розробленим раніше обладнанням, масштабованими на великі обсяги матеріалу, що зберігається. Зрозуміло, що технології повинні забезпечувати належну ефективність, показником чого має бути зниження відсотка втрат зернопродукту. У цьому відношенні суттєво важливі методи управління, які застосовуються в рамках технологічних процесів зберігання зернопродуктів, а також методи контролю за поточним станом зернопродуктів для коректної організації роботи технологічних процесів. Цікавими, зокрема, є методи з використанням елементів штучного інтелекту. У тому числі, перспективні нейронні мережі, особливо здатні до навчання «без вчителя» - карти Кохонена (КК). Модифікований алгоритм КК [2] реалізує скорочений час навчання [3], що є актуальним при реалізації адаптивних процедур обробки результатів вимірювань контрольованих параметрів. **Мета цієї роботи** – розгляд принципів використання модифікованих карт Кохонена для класифікації ситуацій стосовно дистанційного контролю якості зберігання зернових продуктів.

**Ключові слова:** зерно, карти Кохонена, система ідентифікації умов, енергозбереження.

### Интеллектуальные подходы к организации удаленного контроля качества хранения зерновых продуктов

В. А. Дяченко, А. С. Ляшенко, О. Ф. Михаль, М. С. Уманець

**Аннотация.** Зерновые – существенная часть питательного рациона вида *Homo sapiens*. Со времён позднего неолита, с переходом на оседлое земледелие, работа с зерном (выращивание, хранение, переработка, приготовление пищевых продуктов) стала традиционным видом профессиональной человеческой деятельности. В рамках накопленного исторического опыта, по данному виду деятельности были разработаны и оптимизированы многочисленные технологические процессы. Соответствующие технологии развивались в тесной связи с изменением жизненных потребностей, буквально под давлением Дарвиновского естественного отбора, поскольку были непосредственно связаны с выживанием вида *Homo sapiens*. Дальнейшее развитие технологий зернообработки остаётся неизменно актуальным и по сей день, в подтверждение чего – доклад [1], представленный ООН, о состоянии продовольственной безопасности и питания в мире – с ужасающими цифрами, изображающими нужду и бедствия широких народных масс населения планеты. Важной составляющей зернообработки являются технологии, связанные с хранением зернопродуктов. Часть хранимых зернопродуктов используется в качестве семенного фонда для нового цикла реализации зернообеспечения, другая – существенная – для переработки в пищевые продукты. При этом, вновь разрабатываемые (оптимизируемые, совершенствуемые) технологии зернохранения должны быть безопасными, малозатратными, максимально совместимыми с разработанным ранее (имеющимся в наличии) оборудованием, масштабируемыми на большие объёмы хранимого материала. Разумеется, технологии должны обеспечивать надлежащую эффективность, показателем чего должно являться снижение процента потерь зернопродукта. В этом отношении существенно важны методы управления, применяемые в рамках технологических процессов хранения зернопродуктов, а также методы контроля за текущим состоянием зернопродуктов для корректной организации работы технологических процессов. Интересны, в частности, методы с использованием элементов искусственного интеллекта. Среди них, перспективны нейронные сети, в особенности способные к обучению «без учителя» - карты Кохонена (КК). Модифицированный алгоритм КК [2] реализует сокращённое время обучения [3], что актуально при реализации адаптивных процедур обработки результатов измерений контролируемых параметров. **Цель настоящей работы** – рассмотрение принципов использования модифицированных карт Кохонена для классификации ситуаций применительно к дистанционному контролю качества хранения зерновых продуктов.

**Ключевые слова:** зерно, карты Кохонена, система идентификации условий, энергосбережение.

Serhii Chalyi, Volodymyr Leshchynskyi

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

## HIERARCHICAL REPRESENTATION OF CAUSAL RELATIONSHIPS TO DETAIL EXPLANATIONS IN INTELLIGENT SYSTEMS

**Abstract.** The **subject** of research in the article is the processes of constructing explanations in intelligent systems based on the use of causal dependencies. The aim is to develop a hierarchical representation of causal relationships between the actions of an intelligent system to form an explanation of the process of the system's operation with a given degree of generalization or detailing. Representation of the hierarchy of cause-and-effect relationships allows you to form an explanation at a given level of detail using the input data in the form of a temporally ordered sequence of events reflecting the known actions of an intelligent system. **Tasks:** structuring the hierarchy of cause-and-effect relationships for known variants of the decision-making process in an intelligent information system, considering the temporal ordering of the corresponding actions; development of a model of a multi-level representation of causal dependencies for description for explanations in an intelligent system. **The approaches used** are: counterfactual analysis of causality, used to describe alternative dependencies for possible decision-making options; linear temporal logic to reflect the temporal aspect of causation. The following **results** were obtained. A generalized hierarchy of cause-and-effect relationships is highlighted for the known variants of the process of obtaining recommendations in an intelligent information system based on the temporal ordering of the corresponding decision-making actions. A model of hierarchical representation of causal dependencies has been developed to describe explanations in an intellectual system with a given degree of detail. **Conclusions.** The scientific novelty of the results obtained is as follows. A model of hierarchical representation of time-ordered causal relationships is proposed to describe the explanations of the operation of an intelligent system with a given degree of detail. At the top level of the hierarchy, the model defines a generalized causal relationship between the event of using the input data and the event of the result of the system's operation. This connection describes the current task that the intelligent information system solves. At the lower level, cause-and-effect relationships are set between events sequential in time, between which there are no other events. At intermediate levels of the hierarchical representation, the causal dependencies of pairs of events are determined, between which there are other events. The developed model creates conditions for constructing explanations with a given degree of detailing of the actions of the decision-making process in an intelligent system. The model also provides the ability to describe early and late anticipation of alternative sequences of the decision-making process by describing causal dependencies for events between which there are other events.

**Keywords:** intellectual system, explanation, counterfactual analysis, causality, causation, temporal logic.

### Introduction

The effectiveness of practical application of solutions that form intelligent systems is determined by the confidence of users in the results. The analysis of the mechanisms of perception of such results presented in [1] reflected the importance of developing explanations for the decision-making process, as modern intelligent systems have the form of a black box for the user [2]. The use of explanations provides greater trust of users, as well as the successful application of the recommendations [3].

To date, there are two alternative approaches to constructing explanations. The first involves the integration of the mechanism of explanations directly in the design of intelligent information system [1]. In this case, the principle of the white box is implemented, i.e. the process of obtaining a solution is interpreted directly within the intelligent system. The disadvantage of this approach is that the system must be designed with explanatory possibilities.

An alternative black box approach assumes that explanations are constructed on the basis of external causal relationships. Such dependencies are formed on the basis of known sequences of events that reflect the process of the intelligent system. Events are considered information about the actions performed by the intelligent system, user actions, and so on. The second approach is more flexible because it can be used to construct explanations for existing intelligent systems. For example, this approach provides complementary

explanations to existing recommendation systems [4]. This indicates the relevance of the formalization of causal relationships to build explanations for the process of the intelligent system.

Existing approaches to constructing cause-and-effect relationships for constructing explanations are based primarily on work on counterfactual analysis [5-7]. This approach considers causality for the realized sequence of events in comparison with potentially possible but not realized sequences.

The counterfactual approach to the definition of causality is characterized by temporal asymmetry [4], which makes it possible to consider the temporal aspect and use the operators of temporal modal logic to formally describe the determined causal relationships [8]. Such dependencies play the role of constraints in the decision-making process. That is, they must be performed for all possible options for obtaining recommendations in the intelligent system [9].

In [10] it was shown that the causal relationship between events according to the counterfactual approach should consider the context of the decision-making process. This means that dependencies can be established with different levels of detail. This possibility of describing cause-and-effect relationships provides the creation of multilevel explanations, with details depending on the needs of the user [11].

However, existing approaches to the construction of the representation of causal relationships do not pay enough attention to the multilevel description of such



dependencies. Therefore, building a hierarchy of causal relationships considering the temporal aspect is an important task, the solution of which makes it possible to adapt the explanation to the current requirements of the user.

**The aim of the article** is to develop a hierarchical representation of causal relationships between the actions of the intelligent system to form an explanation of the description of the process of the system with a given degree of generalization or detail.

Representation of the hierarchy of causation makes it possible to form an explanation at a given level of detail using input data in the form of a temporally ordered sequence of events that reflect the known actions of the intelligent system.

To achieve this goal the following tasks are solved:

- structuring the hierarchy of causal relationships for known variants of the decision-making process in an intelligent information system, considering the temporal ordering of relevant actions;
- development of a model of multilevel representation of causal dependences for description for explanations in the intelligent system.

### Structuring of the hierarchy of causal dependencies

Counterfactual analysis of causal relationships requires the identification of actual events, as well as alternative events that cannot occur in this implementation of the decision-making process in the intelligent system. Since the decision-making process can be performed repeatedly, for each current implementation, alternative sequences of actions are such that "cannot occur" [7, 12, 13].

In fact, for each sequence of actions  $D_i = \{d_{i,j}\}$

there is an alternative sequence  $D_l, l \neq i$ , which was implemented in the intelligent system. Therefore, when constructing causal relationships, it is necessary to consider all known options  $D = \{D_i\}$  for the decision-making process. These sequences may contain different (or identical) causal relationships. Dependencies that are performed in all decision-making processes, form the basic sequence of actions common to all options for solving the problem in the intelligent system. Different dependencies form alternative sequences of actions. That is, on the set of sequences of actions  $D$  there are common fragments that form the "skeleton" of the decision-making process. There are also different sequences of actions that form a variable part of the decision-making process.

– causal relationships that define explanations for typical sequences of actions for all variants of the decision-making process;

– dependencies that determine the differences between the options of the decision-making process.

The set of these dependencies forms a hierarchy, which makes it possible to gradually identify differences in the overall scheme of the decision-making process in the intelligent system. The most common causal relationship is the causal relationship between the first

and last actions of the decision-making process. If the system solves different variants of the same problem, then the first and last action are similar or the same. For example, the first step is to process the input data, and the last is to present the solution to the user.

The most detailed causal relationships link actions  $d_{i,j}$  and  $d_{i,j+1}$ , between which there are no other actions. That is, a detailed explanation of the decision-making process in the intelligent system can be formed on the basis of pairs of actions  $(d_{i,j}, d_{i,j+1})$ , between

which there is a causal connection. Such dependencies may differ for different implementation options of the decision-making process. For example, in the recommendation subsystem of the e-commerce system, additional steps can be taken when building recommendations if the user has installed filters on items of interest.

Intermediate levels of the description of causal dependencies can connect mainly sequences of actions between which other actions are carried out. In this first case, the key actions that are essential for constructing an explanation are highlighted. A causal link is established between these actions, which implicitly takes into account the intermediate causal links between the intermediate actions of the decision-making process.

Additionally, sequences can be used  $(d_{i,j}, d_{i,j+1})$ .

The hierarchy of causal dependencies, reflecting their presented details, is presented in the table. In general, this hierarchy contains causal dependencies, which are restrictions on the allowable sequence of actions for variants of the decision-making process, as well as dependencies that are performed for a subset of variants of this process.

### Probabilistic model of causation for counterfactual explanations in intelligent systems

A counterfactual approach to the description of causality involves the selection of both the current causal relationship and alternatives to such relationships. Each current implementation of causal dependencies is reflected in the facts of the occurrence of individual pairs of events or sequences of such events that correspond to the actions of the decision-making process in the intelligent system [14].

That is, the description of the determined causal relationship within the counterfactual approach is given for the set  $E$  of all known sequences of events  $E_i$  that occurred during the formation of the solution in the intelligent system:

$$E_i = \left\langle e_{i,0}, e_{i,1}, \dots, e_{i,j}, e_{i,j+1}, \dots, e_{i,|E_i|} \mid E_i \right\rangle, \quad (1)$$

$$w(\forall i \forall j) t_{i,j} < t_{i,j+1}$$

where  $e_{i,j}$  – events that reflect the decision-making process in the intelligent system; each event has properties that reflect the state of the elements of such a system;  $t_{i,j}$  – the time of occurrence of the event  $e_{i,j}$ .

Table 1 – Hierarchy of causal dependencies

Actions	Level	Properties
Relationship between the first and last action of the decision-making process (for example, between the processing of input data and the presentation of the result to the user)	The top level of the hierarchy, without detailing the decision-making process	Limits the class of tasks that the intelligent system solves
Relationship between actions with intermediate actions (i.e. minor actions are skipped)	Intermediate levels, highlighting the key steps of the decision-making process	Specifies a causal relationship that displays the result of a sequence of intermediate actions
The relationship between actions between which there are no other actions	Lower	Specifies a clear causal link between all actions of the decision-making process

The sequence  $E_i$  of events  $e_{i,j}$  has the following properties:

- the order of events  $e_{i,j}$  in time is determined by timestamps  $t_{i,j}$ ;
- the initial event of the sequence  $E_i$  reflects the execution of the operation or procedure of data entry for decision-making in the intelligent system;
- the final event  $e_{i,|E_i|}$  reflects the fact of displaying the resulting decision of the intelligent system;
- event information is available directly when the user interacts with the intelligent system;
- event information can be obtained from logs or intelligent system databases.

Examples of such sequences are knowledge-intensive business process logs, records of user interaction with the referral system, and more.

Then deterministic causal relationships  $c_{j,k}^{(n)}$  between events  $e_{i,j}$  and  $e_{i,k}$  arise if, after the first event in any sequence  $E_i$ , a second event always occurs due to  $n$  intermediate events. If the first event  $e_{i,j}$  is absent in at least one sequence, then the second event never occurs in this sequence.

According to (1), each event  $e_{i,j}$  has a timestamp  $t_{i,j}$ . This property makes it possible to display a deterministic causal relationship  $c_{j,k}^{(n)}$  using the modal temporal logic operators X (NeXt) and F (Future) as follows:

$$c_{j,k}^{(0)} = f_{i,j} X f_{i,k}, \tag{2}$$

$$c_{j,k}^{(n)} = f_{i,j} F \overline{f_{i,k}} \quad n = 1, \min(|E_i|) - 1, \tag{3}$$

where  $f_{i,j}, f_{i,k}$  – facts of occurrence of events  $e_{i,j}$  and accordingly  $e_{i,k}$ ;  $n$  – the number of facts of occurrence of intermediate events between events  $e_{i,j}$  and  $e_{i,k}$ .

Every fact  $f_{i,j}$  of occurrence of an event  $e_{i,j}$  is true if the time of occurrence of this event is known  $t_{i,j}$ :

$$f_{i,j} = true, \text{ iff } \exists t_{i,j} : t_{i,j} \neq 0. \tag{4}$$

The availability of information about the time of occurrence of events confirms the facts of their implementation.

Therefore, the use of this information is a necessary condition for determining the causal relationships according to the factual approach.

In expressions (2) and (3) logical variables of the facts  $f_{i,j}, f_{i,k}$  of occurrence of events are used as events  $e_{i,j}$  and  $e_{i,k}$  are described by set of values of their properties directly. Each property of an event has a finite set of values. All possible property values can be obtained from logs or from the database of the intelligent system.

The number  $n$  of intermediate event facts for expression (2) is 0, because the temporal operator “NeXt” specifies a pair of consecutive facts.

That is, the event  $e_{i,k}$  occurs immediately after the  $e_{i,j}$  event.

The maximum number of facts of intermediate events when using the operator "Future" is determined by the length of the minimum sequence of events  $E_i$ . This limitation is due to the fact that the determined causal relationship must be performed on all sequences  $E_i$ . That is, the number of facts of intermediate events should be the same for everyone  $E_i$ .

Combining expressions (2) and (3) makes it possible to determine the existence of a causal relationship between events  $e_{i,j}$  and  $e_{i,k}$  so:

$$(\forall i) \exists c_{j,k}^{(n)} : \exists (f_{i,j}, f_{i,k}) : n = k - j - 1. \tag{5}$$

Deterministic dependence (5) has the following properties:

- performed on all sequences of events  $E_i$ ;
- the number of facts of intermediate events between  $f_{i,j}, f_{i,k}$  is the same for all sequences  $E_i$ .

The latter characteristic is an additional limitation for the traditional counterfactual definition of causality [5]. However, it makes it possible to consider the choice of alternatives in the decision-making process, as well as cycles of actions to build such a decision. In particular, when choosing an alternative in the “If-Then” construct, the same events may occur sequentially, but the number of intermediate events will differ. This situation occurs after the event  $e_{i,j}$  when choosing one of the

alternatives, ancillary actions are performed that do not affect the final event  $e_{i,k}$ .

The causal relationship (5) between pairs of events makes it possible to determine the causal relationship of the species “The sequence of actions of the intelligent system  $\rightarrow$  resulting recommendation”. The sequence of actions is displayed by a sequence of events  $E_i$ . Selecting a subset of the main events from this sequence makes it possible to describe causal dependencies with different degrees of detail by combining temporal operators X and F for temporal dependences (2) and (3). That is, the decision-making process can be represented as a hierarchy of subprocesses. Each of these subprocesses contains a subset of events at a given level of generalization.

The top-level dependence  $c_{0,fin}^{(+)}$  describes the causal relationship between the input data and the result obtained. Let the initial event  $e_{i,0}$  reflects the execution of the procedure of data entry into the intelligent system, and the latter  $e_{i,fin}$  – the output of the system. Then the dependence  $c_{0,fin}^{(+)}$  looks like:

$$c_{0,fin}^{(+)} : (\forall i) f_{i,0} F f_{i,fin}. \quad (6)$$

where  $f_{i,0}, f_{i,fin}$  – the facts of the initial and final event of the sequence  $E_i$ ; the “+” index specifies any number of intermediate facts  $f_{i,j}$ , as each sequence can have a different number of events.

For example, for a recommendation system in an e-commerce system, the top-level dependency that explains the recommendation may look like “For items with user-defined properties, the most popular products are < Product List >”. For example, for a recommendation system in an e-commerce system, the top-level dependency that explains the recommendation may look like “For items with user-defined properties, the most popular products are <Product List>”.

The causal relationship (6) describes all possible alternative sequences of the intelligent system, which lead to similar recommendations. Therefore, such dependence should be considered as a global constraint that specifies a typical subset of input parameters and the corresponding recommendation. For the above example of causal dependence in the e-commerce system, the user can select products of a certain category with a given set of properties (brand, price, etc.). The result is also products with a certain set of properties (in this example – the most popular products).

Then the causal relationship (6) will be executed only for the initial and final events of the given subsets  $E_0$  and  $E_{fin}$  accordingly:

$$E_0 = \{e_{i,0}\}, E_{fin} = \{e_{i,fin}\} : (\forall i) \exists E_i \in E.$$

Dependence  $c_{0,fin}^{(+)}$  is a constraint, i. e. it must be satisfied for all sequences from the set  $E$  :

$$(\forall E_i \in E) \exists c_{0,fin}^{(+)}. \quad (7)$$

According to (7), the causal relationship (6) is determined only for a finite set of sequences  $E$ . Each sequence in this set uses similar input and solves the same problem. This approach makes it possible to generalize the actual sequence of events and construct causal relationships  $c_{j,k}^{(n)}$ . That is, we obtain deterministic dependences for all known options for forming a solution to a specific problem in an intelligent system. At the upper level of generalization, all these processes are one dependence  $c_{0,fin}^{(+)}$ . Dependencies are used at more detailed levels  $c_{j,k}^{(+)}, c_{j,k}^{(n)}, c_{j,k}^{(0)}$ .

Dependency  $c_{j,k}^{(n)}$  actually sets implicit links between events that reflect identical sequences of actions for alternatives to the decision-making process:

$$c_{0,fin}^{(+)} = \bigwedge_j c_{j,k}^{(n)}. \quad (8)$$

Dependence  $c_{j,k}^{(0)}$  used at the level of maximum detail of the description of causal relationships, as it determines the explicit causal relationship for a pair of events that have occurred consistently in time:

$$c_{j,k}^{(n)} = c_{j,j+1}^{(0)} \wedge c_{j+1,j+2}^{(0)} \wedge \dots \wedge c_{k-1,k}^{(0)}. \quad (9)$$

Accordingly, the upper level dependence can be represented as a sequence of detailed causal relationships:

$$c_{0,fin}^{(+)} = c_{1,2}^{(0)} \wedge c_{2,3}^{(0)} \wedge \dots \wedge c_{fin-1,fin}^{(0)}. \quad (10)$$

Thus, the model of the hierarchy of causal relationships contains causal relationships  $c_{j,k}^{(n)}$  with varying degrees of detail in the decision-making process:

$$M = \left\{ \begin{array}{l} c_{j,k}^{(n)} : n = \left\{ +, 0, 1, \dots, \min(|E_i|) - 1 \right\}, \\ j = 0, \max(|E_i|) - 1, k = 1, \max(|E_i|), \\ i \qquad \qquad \qquad i \end{array} \right\}. \quad (11)$$

Relationship between dependencies  $c_{j,k}^{(n)}$  is given by expressions (8)-(10).

An important feature of this model is that it allows you to describe the early and late advance of events [4]. The essence of anticipation is to interrupt the main implementation of the decision-making process depending on the occurrence of events in the alternative implementation. Or an alternative implementation depending on the events in the main process. The description of the advance of events is carried out using the middle level of the hierarchy. To do this, dependencies  $c_{j,k}^{(n)}$  are set for different alternatives, which in one case contain the main event, and in another – the overlapping event.

## Conclusions

A generalized hierarchy of causal relationships for known variants of the process of obtaining recommendations in the intelligent information system based on the temporal ordering of relevant decision-making actions is highlighted.

At the top level of this hierarchy is determined by the class of tasks that solve the intelligent information system. At the lower level, the causal relationships between the elementary actions of the decision-making process in such a system are set.

A model of multilevel representation of time-ordered causal dependences is proposed to describe explanations of the operation of an intelligent system with a given degree of detail. The model considers the relationships between events that reflect the actions of the intelligent system. At the top level of the hierarchy, the

model defines a generalized causal relationship between the event of the use of input data and the event of obtaining the result of the system. Top-level causal communication is a constraint that determines the task that an intelligent information system solves. The lower level describes the causal relationships between successive events over time, between which there are no other events. At intermediate levels of the hierarchical representation, causal relationships are determined for pairs of events, among which there are other events.

The developed model provides conditions for construction of explanations with the set degree of detailing of actions of process of decision-making in intelligent system.

The model also provides the ability to describe early and late anticipation for alternative sequences of the decision-making process by describing causal relationships for events that include other events.

## REFERENCES

1. Miller T. (2019), "Explanation in artificial intelligence: Insights from the social sciences", *Artificial Intelligence*, vol. 267, pp.1-38, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.artint.2018.07.007>.
2. Castelvechi D. (2016), "Can we open the black box of AI?" *Nature*, Vol. 538 (7623), pp. 20-23.
3. Arrieta B., Rodriguez N. and Del Ser J. (2020), "Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, Taxonomies, Opportunities and Challenges toward Responsible AI", *Information Fusion*, Vol 58, pp. 82-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.12.012>.
4. Chalyi S., Leshchynskiy V. and Leshchynska I. (2019), Designing explanations in the recommender systems based on the principle of a black box. *Advanced information systems*, Vol. 3, No 2, pp. 47-51. DOI: 10.20998/2522-9052.2019.2.08.
5. Lewis D. (1973), Causation. *Journal of Philosophy*. № 70 (17). P. 556-567.
6. Lewis D. (1979), Counterfactual Dependence and Time's Arrow. *Counterfactuals and Laws*. Vol. 13, №. 4. P. 455-476.
7. Lewis D. (2000), Causation as influence. *Journal of Philosophy*. Vol. 97, №. 4. P. 182-97.
8. Chalyi S., Leshchynskiy V. and Leshchynska I. (2019), Modeling explanations for the recommended list of items based on the temporal dimension of user choice. *Control, navigation and communication systems*, Vol. 6 (58), pp. 97-101. doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.6.097>.
9. Chalyi S., Leshchynskiy V. and Leshchynska I. (2019). Method of forming recommendations using temporal constraints in a situation of cyclic cold start of the recommender system. *EUREKA: Physics and Engineering*, 4, 34-40. DOI:10.21303/2461-4262.2019.00952.
10. Paul L. A. Aspect Causation. In Collins, Hall & Paul. 2004. P. 205-24.
11. S. Chalyi, V. Leshchynskiy, I. Leshchynska (2020)? Multilevel personalization of explanations in recommender systems *Advanced Information Systems*. Vol. 4, No 2. – P. 170-175.
12. Halpern J. Y., Pearl J. (2005), Causes and explanations: A structural-model approach. Part I: Causes. *The British Journal for the Philosophy of Science*. Vol. 56 (4). P. 843-887.
13. Halpern J. Y., Pearl J. (2005), Causes and explanations: A structural-model approach. Part II: Explanations. *The British Journal for the Philosophy of Science*. Vol.56 (4). P. 889-911.
14. Chala O. (2019), Development of information technology for the automated construction and expansion of the temporal knowledge base in the tasks of supporting management decisions. *Technology audit and production reserves*. Vol. 1/2(45). P. 9-14. DOI: 10.15587/2312-8372.2019.160205.

Received (Надійшла) 11.10.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.11.2021

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Чалий Сергій Федорович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Serhii Chalyi** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Professor of Information Control Systems Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [serhii.chalyi@nure.ua](mailto:serhii.chalyi@nure.ua); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9982-9091>.

**Лещинський Володимир Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Volodymyr Leshchynskiy** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Software Engineering Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [volodymyr.leshchynskiy@nure.ua](mailto:volodymyr.leshchynskiy@nure.ua); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8690-5702>.

### Ієрархічна модель каузальних зв'язків для деталізації пояснень в інтелектуальних системах

С. Ф. Чалий, В. А. Лещинський

**Анотація.** Предметом вивчення в статті є процеси побудови пояснень в інтелектуальних системах на основі використання каузальних залежностей. **Метою** є розробка ієрархічного представлення каузальних зв'язків між діями інтелектуальної системи для формування пояснення щодо опису процесу роботи системи із заданим ступенем узагальнення або деталізації. Представлення ієрархії причинно-наслідкових зв'язків дає можливість сформулювати пояснення на заданому рівні деталізації з використанням вхідних даних у вигляді темпорально упорядкованої послідовності подій, що відображають відомі дії інтелектуальної системи. **Завдання:** структуризація ієрархії причинно-наслідкових залежностей для відомих варіантів процесу прийняття рішення в інтелектуальній інформаційній системі з урахуванням темпоральної упорядкованості відповідних дій; розробка моделі багаторівневого представлення каузальних залежностей для опису для пояснень в інтелектуальній системі. Використовуваними **підходами** є: контрфактичний аналіз каузальності, який застосовується для опису альтернативних залежностей для можливих варіантів процесу прийняття рішення; лінійна темпоральна логіка, яка дає можливість відобразити темпоральний аспект каузальності. Отримані наступні **результати**. Виділено узагальнену ієрархію причинно-наслідкових залежностей для відомих варіантів процесу отримання рекомендацій в інтелектуальній інформаційній системі на основі темпоральної упорядкованості відповідних дій з прийняття рішення. Розроблено модель багаторівневого представлення каузальних залежностей для опису для пояснень в інтелектуальній системі із заданим ступенем деталізації. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Запропоновано модель ієрархічного представлення упорядкованих у часі причинно-наслідкових залежностей для опису пояснень щодо роботи інтелектуальної системи із заданим ступенем деталізації. На верхньому рівні ієрархії модель визначає узагальнений каузальний зв'язок між подією використання вхідних даних та подією отримання результату роботи системи. Даний зв'язок визначає поточну задачу, яку вирішує інтелектуальна інформаційна система. На нижньому рівні задаються причинно-наслідкові залежності між послідовними в часі подіями, між якими не існують інші події. На проміжних рівнях ієрархічного представлення визначаються каузальні залежності для пар подій, між якими є інші події. Розроблена модель створює умови для побудови пояснень із заданим ступенем деталізації дій процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі. Також модель забезпечує можливість опису раннього та пізнього випередження для альтернативних послідовностей виконання процесу прийняття рішення шляхом опису каузальних залежностей для подій, між якими є інші події.

**Ключові слова:** інтелектуальна система; пояснення; контрфактичний аналіз; каузальність; причинно-наслідковий зв'язок; темпоральна логіка.

### Иєрархическая модель каузальных связей для детализации пояснений в интеллектуальных системах

С. Ф. Чалий, В. А. Лещинский

**Аннотация.** Предметом исследования в статье являются процессы построения объяснений в интеллектуальных системах на базе использования каузальных зависимостей. **Целью** является разработка иєрархического представления каузальных связей между действиями интеллектуальной системы для формирования объяснения процесса работы системы с заданной степенью обобщения или детализации. Представление иєрархии причинно-следственных связей позволяет сформировать объяснение на заданном уровне детализации с использованием входных данных в виде темпорально упорядоченной последовательности событий, отражающих известные действия интеллектуальной системы. **Задания:** структуризация иєрархии причинно-следственных зависимостей для известных вариантов процесса принятия решения в интеллектуальной информационной системе с учетом темпоральной упорядоченности соответствующих действий; разработка модели многоуровневого представления каузальных зависимостей для описания для пояснений в интеллектуальной системе. Используемыми **подходами** являются: контрфактический анализ каузальности, применяемый для описания альтернативных зависимостей для возможных вариантов принятия решения; линейная темпоральная логика, позволяющая отразить темпоральный аспект каузальности. Получены следующие **результаты**. Выделена обобщенная иєрархия причинно-следственных зависимостей для известных вариантов процесса получения рекомендаций в интеллектуальной информационной системе на основе темпоральной упорядоченности соответствующих действий по принятию решения. Разработана модель иєрархического представления каузальных зависимостей для описания объяснений в интеллектуальной системе с заданной степенью детализации. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов состоит в следующем. Предложена модель иєрархического представления упорядоченных по времени причинно-следственных зависимостей для описания объяснений работы интеллектуальной системы с заданной степенью детализации. На верхнем уровне иєрархии модель определяет обобщенную каузальную связь между событием использования входных данных и событием результата работы системы. Данная связь описывает текущую задачу, которую решает интеллектуальная информационная система. На нижнем уровне задаются причинно-следственные зависимости между последовательными во времени событиями, между которыми не существуют другие события. На промежуточных уровнях иєрархического представления определяются каузальные зависимости пар событий, между которыми есть другие события. Разработанная модель создает условия для построения пояснений с заданной степенью детализации действий процесса принятия решения в интеллектуальной системе. Также модель обеспечивает возможность описания раннего и позднего опережения альтернативных последовательностей выполнения процесса принятия решения путем описания каузальных зависимостей для событий, между которыми есть другие события.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система; объяснение; контрфактический анализ; каузальность; причинно-следственная связь; темпоральная логика.

# Methods of information systems protection

UDC 004.056:654.026

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.15>О. Ю. Юдін<sup>1</sup>, В. М. Сидоренко<sup>2</sup>, С. О. Гнатюк<sup>1,2</sup>, О. С. Верховець<sup>1</sup><sup>1</sup> Державний науково-дослідний інститут технологій кібербезпеки та захисту інформації, Київ, Україна<sup>2</sup> Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ КІЛЬКІСНОГО КРИТЕРІЮ ОЦІНЮВАННЯ ЗАХИЩЕНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ДЕРЖАВИ

**Анотація.** Предмет статті – методи та моделі оцінки критичності галузевих інформаційно-телекомунікаційних систем (ІТС). Мета даної статті – провести аналіз існуючих методів та моделей оцінки критичності та використовуючи його результати запропонувати функціональну модель розрахунку кількісного критерію оцінки захищеності ІТС. Результати. На основі відомого методу аналізу ієрархій запропоновано функціональну модель розрахунку кількісного критерію оцінки захищеності ІТС, яка за рахунок обробки експертних оцінок, дозволяє отримати кількісний показник захищеності ІТС. Це дає можливість спростити процедуру підбору експертів, уникнути специфіки обробки експертних даних, а також здійснити оцінювання ІТС в умовах обмежених обсягів статистики. Висновки. Проведене дослідження показало, що розроблена модель розрахунку кількісного критерію оцінки захищеності ІТС, використовуючи попарні порівняння, дозволяє експертам сконцентрувати увагу на проблемі. Крім того, запропонована модель має вбудований критерій якості роботи експерта та дає можливість перейти від якісної оцінки у вигляді упорядкованого ряду буквено-числових комбінацій, до кількісної оцінки у вигляді відношення базового профілю захищеності до профілю захищеності визначеного експертом.

**Ключові слова:** інформаційно-телекомунікаційні системи; критична інфраструктура; критерій оцінки захищеності; функціональний профіль захищеності.

### Вступ

Світові тенденції до збільшення кількості та підвищення складності кібератак зумовили актуалізацію питання захисту галузевих ІТС, зокрема, галузевих, які є критично важливими для функціонування суспільства, соціально-економічного розвитку держави та забезпечення інформаційної складової національної безпеки.

З урахуванням потреб національної безпеки і необхідності запровадження системного підходу до розв'язання проблеми захисту критичної інфраструктури, на загальнодержавному рівні, створення системи захисту такої інфраструктури є одним із пріоритетів у реформуванні сектору оборони і безпеки України [1]. При цьому, основними проблемами, які потребують розв'язання, є: відсутність єдиних критеріїв та методології віднесення ІТС об'єктів інфраструктури до критичної інфраструктури; відсутність єдиної методології оцінювання загроз безпеці ІТС об'єктів критичної інфраструктури.

Необхідно зазначити, що Законом України «Про основні засади забезпечення кібербезпеки України» [2] визначено необхідність формування переліку об'єктів критичної інформаційної інфраструктури та необхідність розробки критеріїв і порядку віднесення об'єктів до об'єктів критичної інфраструктури, а Указом Президента України №96/2016 «Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 27 січня 2016 року «Про Стратегію кібербезпеки України» [3] передбачено, що кіберзахист критичної інфраструктури має полягати, насамперед, у визначенні критеріїв віднесення інформаційних (автоматизованих), телекомунікаційних,

інформаційно-телекомунікаційних систем до критичної інформаційної інфраструктури.

Таким чином, нормативно-правовими актами України задекларовано необхідність розробки єдиних критеріїв і методології віднесення ІТС об'єктів інфраструктури до критичної інфраструктури. При цьому доцільно зазначити, що використання якісних оцінок пов'язане зі складністю їх порівнювання та відтворення. Насамперед, це обумовлено складністю підбору експертів і специфікою обробки експертних даних. Зазначені обмеження свідчать про наявність важливого наукового завдання щодо визначення критеріїв віднесення ІТС до критичної інформаційної інфраструктури.

**Мета даної статті** – провести аналіз існуючих методів та моделей оцінки критичності та використовуючи його результати запропонувати функціональну модель розрахунку кількісного критерію оцінки захищеності ІТС.

### 1. Аналіз існуючих досліджень

З метою вибору оптимального методу розрахунку кількісного критерію оцінки захищеності ІТС здійснено аналіз існуючих методів прийняття рішень.

Методи теорії прийняття рішень застосовуються при відсутності повної інформації про об'єкт дослідження (ІТС). В загальному випадку методи прийняття рішень можна класифікувати по змісту та типу отримуваної експертної інформації [4-6]. Така класифікація наведена в табл. 1 [5].

З наведених чотирьох груп перші три відносяться до методів прийняття рішень в умовах визначеності і тільки четверта до методів прийняття рішень в умовах невизначеності.

Таблиця 1 – Класифікація методів прийняття рішень по змісту та типу експертної інформації

№ з/п	Зміст інформації	Тип інформації	Метод прийняття рішень
1	Експертна інформація не вимагається		1. Метод домінування 2. Метод на основі глобальних критеріїв
2	Інформація про перевагу на множині критеріїв	1. Якісна інформація 2. Кількісна оцінка переваги критеріїв 3. Кількісна інформація про заміщення	1. Лексикографічне упорядкування 2. Порівняння різниць критеріальних оцінок 3. Методи згортки на ієрархії критеріїв 4. Методи «ефективність-вартість» 5. Методи «порогів» 6. Методи ідеальної точки 7. Методи кривих байдужості 8. Методи теорії цінності
3	Інформація про перевагу альтернатив	Оцінка переваги парних порівнянь	1. Методи математичного програмування 2. Лнійна та нелнійна згортки при інтерактивному способі визначення її параметрів
4	Інформація про перевагу на множині критеріїв та про наслідки альтернатив	1. Відсутність інформації про переваги 2. Кількісна інформація про наслідки 3. Якісна інформація про переваги та кількісна про наслідки	1. Методи з дискретизацією невизначеності 2. Стохастичне домінування 3. Методи прийняття рішень в умовах ризику та невизначеності на основі глобальних критеріїв 3. Метод аналізу ієрархій 4. Метод вирішальних матриць 5. Методи теорії нечітких множин 6. Метод практичного прийняття рішень 4. Методи кривих байдужості для прийняття рішень в умовах ризику та невизначеності 7. Методи дерев рішень 8. Декомпозиційні методи теорії очікуваної корисності

З четвертої групи найбільш перспективними [5] є такі методи: теорії очікуваної корисності; аналізу ієрархій; теорії нечітких множин.

**Методи теорії очікуваної корисності** полягають в тому, що кожна можлива дія, породжує наслідки, які характеризуються визначеним набором властивостей, факторів або показників. Обирається та альтернатива, наслідки якої є найбільш кращими. Таким чином, при застосуванні цього методу необхідно отримати кількісні оцінки всіх можливих результатів, які є наслідками процесів прийняття рішень та в подальшому, на підставі цих оцінок, обрати найкращий результат. В загальному випадку метод складається з п'яти етапів [6]:

1. Попередній аналіз. На цьому етапі визначаються можливі варіанти дій, які можливо виконати в процесі рішення.

2. Структурний аналіз. Структуризація проблеми на якісному рівні. Будується дерево рішень. Дерево рішень має два типи вершин: вершини – рішення та вершини – випадки. В вершинах-рішеннях вибір залежить від експерта, а в вершинах-випадках експерт може передбачати вибір з деякою ймовірністю.

3. Аналіз невизначеностей. На цьому етапі приймається рішення встановлення значень ймовірності для тих гілок на дереві рішень, які починаються з вершини-випадку. При цьому всі отримані значення ймовірностей підлягають перевірці на наявність узгодженості.

4. Аналіз корисності. На цьому етапі необхідно отримати кількісні оцінки корисностей наслідків результатів пов'язаних з реалізацією того чи іншого шляху на дереві рішень.

5. Процедури оптимізації. Оптимальна стратегія дій може бути найдена за допомогою розрахун-

ків максимізації очікуваної корисності на всьому просторі можливих результатів.

Перевагою методу є можливість знаходження оптимального рішення в умовах ризику.

В той же час необхідно зазначити, що методи теорії очікуваної корисності мають недоліки, а саме:

- велика трудомісткість пов'язана зі збором інформації про переваги та ймовірнісні розподіли, що відносяться до наслідків [7];

- необхідність залучення аналітиків;
- відсутність механізмів перевірки суджень експертів (осіб приймаючих рішення).

Також, до недоліків згідно [8, 9] необхідно віднести те, що:

- людина не структурує проблеми холістично, як це передбачає теорія очікуваної корисності;

- людина не обробляє інформацію, особливо ймовірності, у відповідності до принципів очікуваної корисності;

- теорія очікуваної корисності погано передбачає поведінку людей, коли їх ставлять перед вибором в ході лабораторних випробувань.

**Метод аналізу ієрархій (МАІ)** є математичним інструментом системного підходу до складних проблем прийняття рішень та реалізує процедуру синтезу пріоритетів, що обраховуються на підставі суб'єктивних суджень експертів. МАІ дозволяє експерту знайти такий варіант рішення завдання (альтернативу), який найкращим чином узгоджується з його розумінням суті проблеми та вимогами до її рішення. В загальному випадку МАІ складається з п'яти етапів [10]:

1) побудова якісної моделі проблеми, що включає мету, альтернативні варіанти досягнення мети та критерії для оцінки якості альтернатив. Модель викладається у вигляді ієрархії;

2) визначення пріоритетів всіх елементів ієрархії з використанням методу парних порівнянь. Формується матриця попарних порівнянь;

3) синтез глобальних пріоритетів альтернатив та отримання вектору пріоритетів;

4) перевірка суджень експертів на узгодженість шляхом оцінки ступеню узгодженості матриці попарних порівнянь;

5) отримання значення найкращої альтернативи та прийняття рішення.

Перевагами методу є [11]:

- використання попарних порівнянь, що дозволяє експерту сконцентрувати увагу на проблемі;
- додатковість вихідної матриці;
- наявність вербально-числової шкали;
- вбудований критерій якості роботи експерта – індексу узгодженості, який надає інформацію про порушення чисельної та транзитивної узгодженості суджень.

Слід зазначити, що МАІ не позбавлений недоліків [12-14], а саме:

- оцінки та порівняння більше дев'яти [13] або десяти [14] об'єктів (критеріїв, альтернатив). Зі збільшенням кількості об'єктів збільшується складність побудувати однорідної матриці попарних порівнянь. Також, обмеження викликані психологічними можливостями людини щодо порівняння та ранжирування великої кількості об'єктів;

- виникнення явища реверсу рангів, тобто зміни порядку раніше порівняних альтернатив при додаванні нових чи видаленні існуючих;

- використання шкали відношень яка є ранговою шкалою кратною одиниці.

**Методи теорії нечітких множин** полягають у формалізації вхідних параметрів у вигляді вектору інтервальних значень (нечіткого інтервалу), а попадання в кожен інтервал характеризується деяким ступенем невизначеності. Межі можливих значень параметрів та області їх найбільш можливих значень визначаються на основі вихідних даних, досвіду та інтуїції. Таким чином основною характеристикою того чи іншого методу є функція приналежності параметру інтервалу [15]. Існує багато методів визначення функцій приналежності, наприклад - методи парних порівнянь, експертних оцінок, лінгвістичних термів з використанням статистичних даних, параметричні, інтервальної оцінки [16].

Можна виділити дві групи методів: прямі та непрямі [17]. Прямі методи полягають у тому, що безпосередньо експерт задає правила визначення функції приналежності, наприклад – методи засновані на ймовірнісній трактовці функції приналежності. Непрямі методи, полягають у тому, що значення функції приналежності обираються таким чином, щоб задовольнити заздалегідь сформульованим вимогам, наприклад – метод найбільших квадратів.

Перевагами методів нечітких множин є [18-21]:

- можливість достатньо об'єктивно проводити оцінку альтернатив за окремими критеріями;
- можливість включати в аналіз якісні змінні, оперувати нечіткими вхідними даними та лінгвістичними критеріями.

В той же час зазначені методи мають і недоліки, а саме [17; 22-23]:

- існує суб'єктивність в виборі функцій приналежності та формуванні правил нечіткого вводу і тому вид функції суттєво залежить від наявних відомостей та характеру задачі;

- необхідність представлення інформації про взаємозв'язок критеріїв;

- кожен метод має свої обмеження та особливості і користувач повинний знати сферу застосування кожного з методів;

- більшість методів нечітких множин показує слабку стійкість результатів відносно вихідних даних.

Найбільшу стійкість мають методи основані на правилах.

З урахуванням зазначеного вбачається за доцільне для розрахунку кількісного критерію оцінки захищеності застосувати метод аналізу ієрархій.

## 2. Основна частина дослідження

**Модель розрахунку кількісного критерію оцінювання захищеності.** Модель розрахунку кількісного критерію оцінки захищеності ІТС з використанням методу аналізу ієрархій дозволяє перейти від якісної оцінки у вигляді упорядкованого ряду буквено-числових комбінацій [24], що позначають рівні реалізованих послуг, до кількісної оцінки у вигляді відношення базового профілю захищеності до профілю захищеності визначеного експертом.

Вхідними даними для моделі є базовий ФПЗ [25] та відкоригований експертом ФПЗ. При цьому, НД ТЗІ 2.5-005-99, що визначає стандартні ФПЗ оброблюваної інформації від НСД, оперує вимогами щодо захисту певної інформації від певних загроз і відомих на сьогоднішній день функціональних послуг, що дозволяють протистояти даним загрозам і забезпечувати виконання вимог, які пред'являються. Враховуючи обмеження методу аналізу ієрархій щодо оцінки та порівняння не більше дев'яти або десяти критеріїв сформуємо групи критеріїв оцінки захищеності інформації (рис. 1). Як видно з рис. 1 найбільша група критеріїв другого рівня, критерії спостережності, може налічувати до 9 критеріїв. Інші групи, критеріїв всіх інших рівнів, налічують від чотирьох до п'яти критеріїв. Таким чином, для аналізу визначених критеріїв можна застосовувати метод аналізу ієрархій.

Блок-схема моделі розрахунку кількісного критерію оцінки захищеності ІТС на основі методу аналізу ієрархій наведена на рис. 2. Метод аналізу ієрархій для визначення співвідношення альтернатив (ФПЗБ та ФПЗЕ) відбувається в такій послідовності:

1. **Будуються матриці попарних порівнянь для кожного рівня критеріїв** (критерії захищеності – 1 рівень, критерії послуг безпеки – 2 рівень, критерії рівнів послуг безпеки – 3 рівень):

$$A = \|a_{ij}\|_{m \times m}, \quad (1)$$

де  $a_{ij} = w_i/w_j$ ,  $w_i$  – «вага»  $i$ -го критерію, При цьому,  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ , а  $a_{ii} = 1$ . Тобто, матриця є позитивною зворотно симетричною.



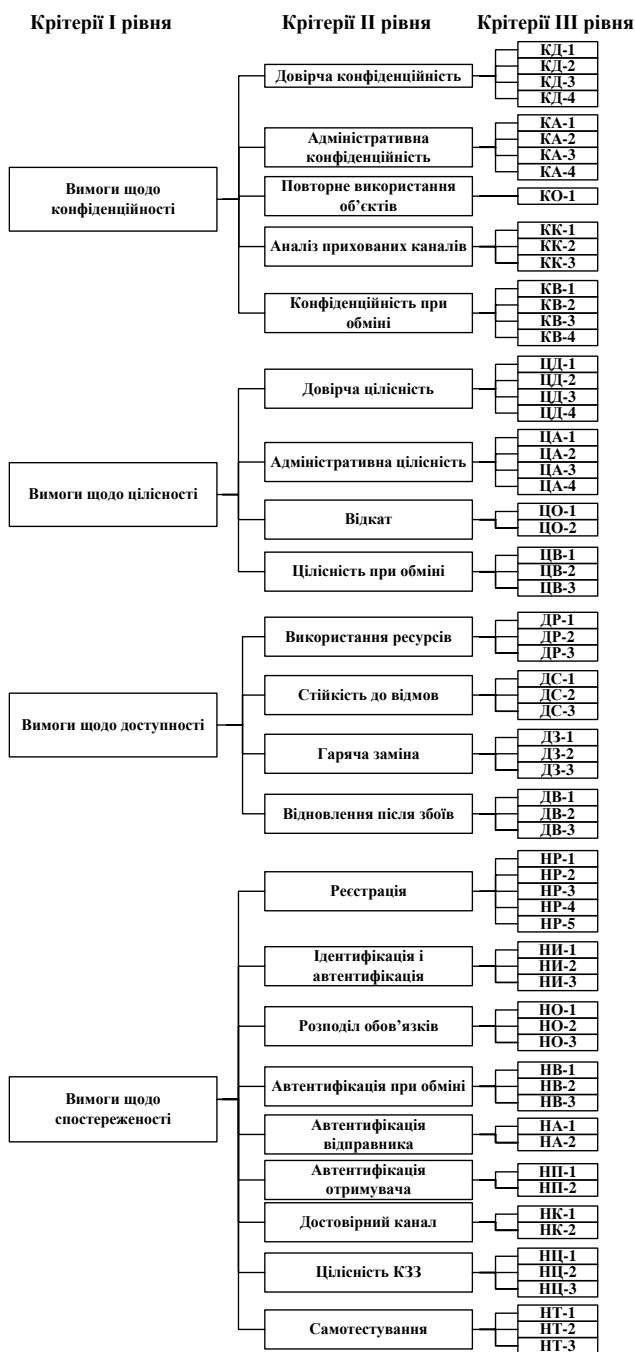


Рис. 1. Групи критеріїв оцінки захищеності інформації

Для визначення ваги будемо використовувати табл. 2 відносної важливості: Для критеріїв захищеності матриця порівнянь буде мати вигляд, наведений у табл. 3: Для критеріїв послуг безпеки складаються свої матриці попарних порівнянь. Всього до 4 матриць. Для критеріїв рівнів безпеки максимальна кількість матриць може скласти 22.

2. *Здійснюється обчислення множини власних векторів матриці*, для чого для кожної строки матриці обчислюється середнє геометричне:

$$a_i = \sqrt[n]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot a_{i3} \cdot a_{in}} = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}, \quad (2)$$

де  $n$  – розмірність матриці.

3. *Здійснюється нормалізація результатів*, результатом якої є нормалізований вектор пріоритетів:

$$\bar{a}_i = \frac{a_i}{\sum_{j=1}^n a_j}, \quad (3)$$

4. *Здійснюється перевірка узгодженості локальних пріоритетів*: Розрахунок найбільшого власного значення матриці здійснюється таким чином:

$$A_i = \sum_{i=1}^n a_{ij}, \quad (4)$$

$$A'_i = A_i \bar{a}_i, \quad (5)$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n A'_i, \quad (6)$$

Розрахунок індексу узгодженості:

$$J_p = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1}, \quad (7)$$

де  $m$  – кількість елементів що порівнюються (розмір матриці).

Перевірка коректності індексу узгодженості здійснюється шляхом розрахунку відношення узгодженості АС за формулою:

$$A_c = \frac{J_p}{R_c}, \quad (8)$$

де  $R_c$  – табличне значення (табл. 4).

У разі, якщо  $A_c \geq 0,10$ , то дані в матриці порівнянь підлягають перегляду та уточненню.

Таблиця 2 – Шкала відносної важливості критеріїв

Вербальна оцінка експерта	Значення $a_{ij}$
$w_i$ абсолютно кращий за $w_j$	9
$w_i$ набагато кращий за $w_j$	8
$w_i$ значно кращий за $w_j$	7
$w_i$ кращий за $w_j$	6
$w_i$ суттєво переважає $w_j$	5
$w_i$ переважає $w_j$	4
$w_i$ дещо переважає $w_j$	3
$w_i$ несуттєво переважає $w_j$	2
критерії рівноцінні	1
$w_j$ несуттєво переважає $w_i$	1/2
$w_j$ дещо переважає $w_i$	1/3
$w_j$ переважає $w_i$	1/4
$w_j$ суттєво переважає $w_i$	1/5
$w_j$ кращий за $w_i$	1/6
$w_j$ значно кращий за $w_i$	1/7
$w_j$ набагато кращий за $w_i$	1/8
$w_j$ абсолютно кращий за $w_i$	1/9

Таблиця 3 – Матриця порівнянь для критеріїв захищеності

	Конфіденційність	Цілісність	Доступність	Спостереженість
Конфіденційність	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$
Цілісність	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$	$a_{24}$
Доступність	$a_{31}$	$a_{32}$	$a_{33}$	$a_{34}$
Спостереженість	$a_{41}$	$a_{42}$	$a_{43}$	$a_{44}$

Таблиця 4 – Випадкові узгодженості для матриць порядку 2-9

Розмір матриці ( $n$ )	2	3	4	5	6	7	8	9
Випадкова узгодженість ( $R_C$ )	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

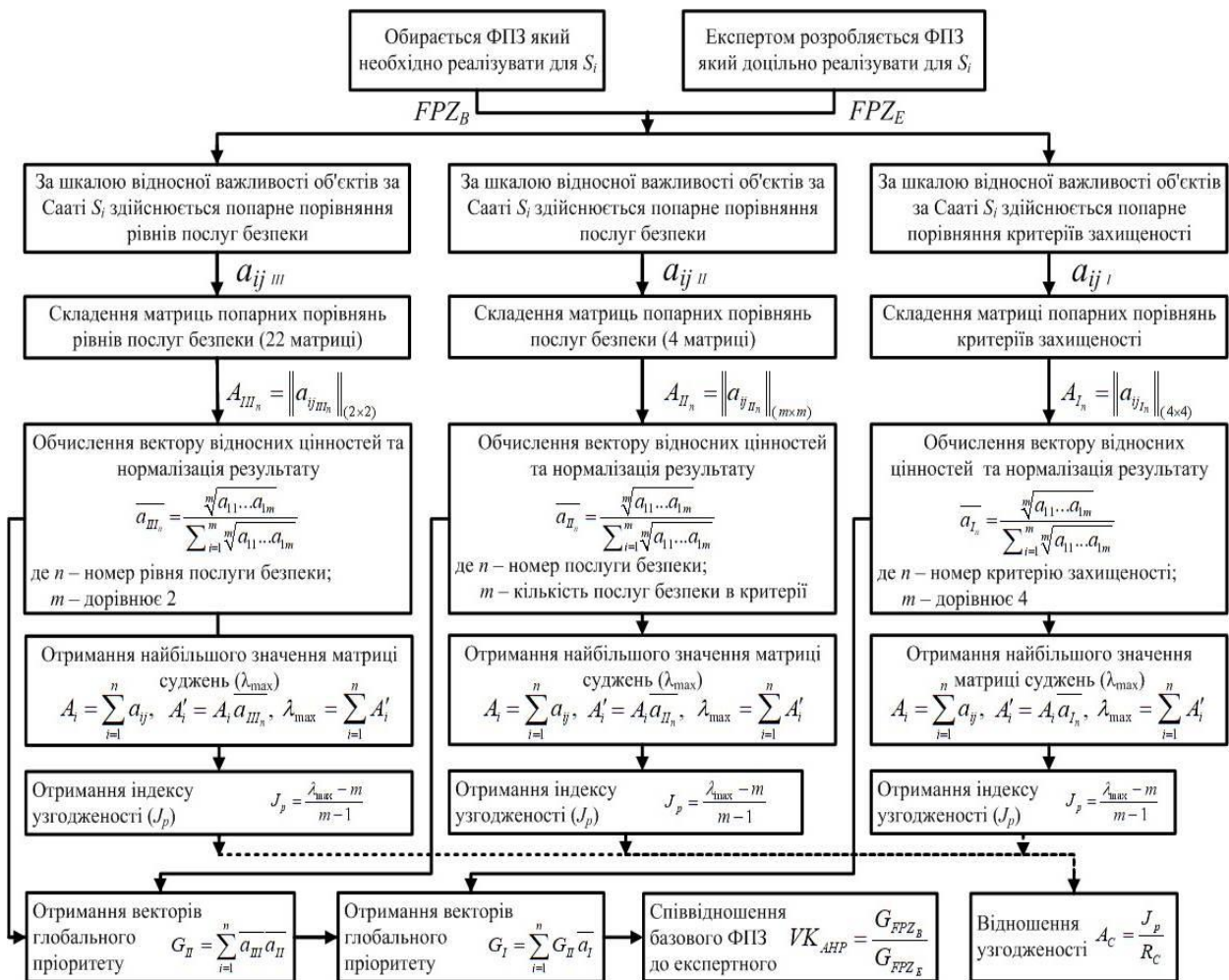


Рис. 2. Блок-схема методу розрахунку кількісного критерію оцінки захищеності ІТС

5. **Розрахунок глобального пріоритету для критеріїв верхнього рівня.** Нормалізований вектор пріоритетів за кожним критерієм нижчого рівня перемножується на нормалізований вектор пріоритетів вищого рівня.

6. Добутки підсумовуються на вищому рівні.

$$G_i = \sum_{i=1}^n a_i \bar{b}_i, \tag{9}$$

де  $n$  – кількість критеріїв рівнів безпеки.

7. **Визначення співвідношення альтернатив (ФПЗБ та ФПЗЕ).**

Для кожного ФПЗ розраховується глобальний пріоритет за категоріями конфіденційності, цілісності, доступності та спостереженості. Відношення цих глобальних пріоритетів, що характеризують кількісний критерій, можна представити у вигляді виразу:

$$VK_{AHP} = \frac{G_{FPZ_B}}{G_{FPZ_E}}, \tag{10}$$

де  $G_{FPZ_B}$  – є табличним значенням ФПЗ для галузевої ІТС, а  $G_{FPZ_E}$  – є ФПЗ отриманий експертом за допомогою структурно-логічної моделі та структурно-функціонального методу формування ФПЗ галузевої ІТС.

Реалізація цієї моделі дозволяє перейти від якісних показників захищеності до кількісних.

### Висновки

У представлений роботі, з метою вибору оптимального способу розрахунку кількісного критерію оцінювання захищеності ІТС, було проведено аналіз існуючих методів прийняття рішень.

Досліджені методи теорії очікуваної корисності, методи аналізу ієрархій та методи теорії нечітких множин.

Визначено, що з урахуванням основних переваг та недоліків зазначених методів, для розрахунку кількісного критерію оцінювання захищеності доцільним вбачається використання методу аналізу ієрархій.

Розроблено модель розрахунку кількісного критерію оцінювання захищеності ІТС, що базується на використанні методу аналізу ієрархій. Зазначена модель використовує попарні порівняння, що в свою чергу дозволяє експерту сконцентрувати увагу на проблемі.

Також, зазначена модель має вбудований критерій якості роботи експерта – індекс узгодженості, який надає інформацію про порушення чисельної та транзитивної узгодженості суджень.

Крім того, розроблена модель дозволяє перейти від якісної оцінки у вигляді упорядкованого ряду буквено-числових комбінацій, що позначають рівні реалізованих послуг, до кількісної оцінки у вигляді відношення базового профілю захищеності до профілю захищеності визначеного експертом.

У подальших роботах планується провести експериментальне дослідження розробленої моделі розрахунку кількісного критерію оцінювання захищеності ІТС.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. С.О. Гнатюк, О.Ю. Юдін, В.М. Сидоренко, Я.П. Євченко «Метод формування функціонального профілю захищеності галузевих інформаційно-телекомунікаційних систем», Кібербезпека: освіта, наука, техніка. – 2021. – Т. 3. – № 11. – С. 166-182.
2. Україна. Закони. «Про основні засади забезпечення кібербезпеки України»: офіц. текст: [прийнятий Верховною Радою 5 жовтня 2017 р.]. К.: Відомості Верховної Ради України, 2017, № 45, ст.403.
3. Указ Президента України №96/2016 «Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 27 січня 2016 року «Про Стратегію кібербезпеки України».
4. Козлов В.Н. Системный анализ, оптимизация и принятие решений: учебное пособие. – М.: Проспект, 2012. – 176 с.
5. Сарапулова Т.В., Раевская Е.А., Пимонов А.Г. Многокритериальный выбор альтернатив на основе метода анализа иерархий: методические указания к лабораторной работе по дисциплине «Математические и инструментальные методы поддержки принятия решений» для магистрантов направления подготовки 09.04.03 «Прикладная информатика». – Кемерово: УИП КузГТУ, 2016. – 30 с.
6. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
7. Кини Р. Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения: Пер. с англ./ Под ред. И. Р. Шахова. - М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
8. Paul J.H. Schoemaker. The Expected Utility Model: Its Variants, Purposes, Evidence and Limitations // Journal of Economic Literature, June 1982, v.XX, no.2, p.529-563.
9. Райфа Г. Анализ решений. Введение в проблему выбора в условиях неопределенности: Пер. с англ. – М.: Наука, 1977. – 408 с.
10. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: Пер. с англ./ Под ред. Р. Г. Вачнадзе. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
11. Тутьгин А.Г. Преимущества и недостатки метода анализа иерархий / Тутьгин А.Г., Коробов В.Б. // Известия Российского государственного педагогического университета имени А.И.Герцена. – СПб., 2010. – №122. – С.108-115.
12. Коробов В. Б. Некоторые проблемы применения экспертных методов на практике / В. Б. Коробов // Научный диалог. – Екатеринбург. – 2013. – № 3(15). – С. 94–108.
13. Миронова Н.А. Интеграция модификаций метода анализа иерархии для Систем поддержки принятия групповых решений / Н.А. Миронова // Радиоелектроніка, інформатика, управління. – Запоріжжя. – 2011. – № 2. – С. 47-54.
14. Емельянов С. В., Ларичев О. И. Многокритериальные методы принятия решений. – М.: Знание, 1985. 32 с.
15. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
16. Борисов А. Н., Крумберг О. А., Федоров И. П. Принятие решений на основе нечетких моделей. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.
17. А. Е. Кононюк. Дискретно-непрерывная математика. (Множества (нечеткие)). – К.: Освіта України. 2012., – 452 с.
18. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения: Пер. с англ./ Под ред. Р. Р. Ягера – М.: Радио и связь, 1986. – 408 с.
19. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедуры принятия решений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – С. 172-175.
20. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Наука, 1981. – 208 с.
21. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
22. Екологічна безпека №2/2013 (16) Структурные приоритеты экспертной системы экологического мониторинга В.П. Дмитриков, В.С. Бахарев.
23. Еремін Н.А. Моделирование месторождений углеводородов E 70 методами нечеткой логики. – М.: Наука, 1994. – 462 с.
24. НД ТЗІ 2.5-004-99 Критерії оцінки захищеності інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу // ДСТСЗІ СБ України. – 1999.

25. Юдін О.Ю. Аналіз вимог до елементів інформаційно-телекомунікаційних систем управління енергетичною інфраструктурою, які забезпечують кіберзахист / О.Ю.Юдін, С.Є. Гнатюк // Перспективні напрями захисту інформації. Третя всеукраїнська наук.-практ. конф., 02-06 вересня 2017 р.: тези доп. – Одеса: ОНАЗ, 2017.

Received (Надійшла) 19.10.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.11.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Юдін Олександр Юрійович** – кандидат технічних наук, заступник начальника Державного науково-дослідного інституту технологій кібербезпеки та захисту інформації, Київ, Україна;

**Oleksii Yudin**, PhD, Vice-Chief of the State Scientific and Research Institute of Cybersecurity Technologies and Information Protection, Kyiv, Ukraine;

e-mail: [alex@ukrdeftech.com.ua](mailto:alex@ukrdeftech.com.ua); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5710-0889>

**Сидоренко Вікторія Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри безпеки інформаційних технологій, Національний авіаційний університет, Київ, Україна;

**Viktoriia Sydorenko**, PhD, Associate Professor, Associate Professor IT-Security Academic Department, National Aviation University, Kyiv, Ukraine;

e-mail: [v.sydorenko@ukr.net](mailto:v.sydorenko@ukr.net); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5910-0837>

**Гнатюк Сергій Олександрович** – доктор технічних наук, професор, заступник декана з наукової роботи Факультету кібербезпеки, комп'ютерної та програмної інженерії, Національний авіаційний університет, Київ, Україна;

**Sergiy Gnatyuk**, DSc, Professor, Vice-Dean for Research of the Faculty of Cybersecurity, Computer and Software Engineering, National Aviation University, Kyiv, Ukraine;

e-mail: [s.gnatyuk@nau.edu.ua](mailto:s.gnatyuk@nau.edu.ua); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4992-0564>

**Верховець Олександр Сергійович** – заступник начальника науково-дослідного центру Державного науково-дослідного інституту технологій кібербезпеки та захисту інформації, Київ, Україна;

**Oleksii Verkhovets**, Vice-Chief of the Research Center of the State Scientific and Research Institute of Cybersecurity Technologies and Information Protection, Kyiv, Ukraine;

e-mail: [o.s.verhts@gmail.com](mailto:o.s.verhts@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3897-106X>

**Модель расчета количественного критерия оценки защищенности информационно-телекоммуникационных систем критической инфраструктуры государства**

А. Ю. Юдин, В. Н. Сидоренко, С. А. Гнатюк, А. С. Верховец

**Аннотация.** Предмет статьи – методы и модели оценки критичности отраслевых информационно-телекоммуникационных систем (ИТС). Цель данной статьи – провести анализ существующих методов и моделей оценки критичности и используя его результаты, предложить функциональную модель расчета количественного критерия оценки защищенности ИТС. Результаты. На основе известного метода анализа иерархий предложена функциональная модель расчета количественного критерия оценки защищенности ИТС, которая за счет обработки экспертных оценок позволяет получить количественный показатель защищенности ИТС. Это дает возможность упростить процедуру подбора экспертов, избежать специфики обработки экспертных данных, а также осуществить оценку ИТС в условиях ограниченных объемов статистики. Выводы. Проведенное исследование показало, что разработанная модель расчета количественного критерия оценки защищенности ИТС, используя попарность сравнений, позволяет экспертам сконцентрировать внимание на проблеме. Кроме того, предложенная модель имеет встроенный критерий качества работы эксперта и позволяет перейти от качественной оценки в виде упорядоченного ряда буквенно-числовых комбинаций, к количественной оценке в виде отношения базового профиля защищенности к профилю защищенности определенного эксперта.

**Ключевые слова:** информационно-телекоммуникационные системы; критическая инфраструктура; критерий оценки защищенности; функциональный профиль защищенности.

**Model of the quantitative criterion calculation for security assessment of the information and telecommunications systems in the critical infrastructure of the state**

Oleksii Yudin, Viktoriia Sydorenko, Sergiy Gnatyuk, Oleksii Verkhovets

**Abstract.** The subject of the article is methods and models for assessing the criticality of industry information and telecommunications systems (ITS). The purpose of this article is to analyze the existing methods and models of criticality assessment and use its results to propose a functional model for calculating the quantitative criterion for assessing the security of ITS. Results. Based on the known method of hierarchy analysis, a functional model for calculating the quantitative criterion for assessing ITS security is proposed, which, through the processing of expert assessments, allows to obtain a quantitative indicator of ITS security. This makes it possible to simplify the procedure for selecting experts, to avoid the specifics of processing expert data, as well as to assess ITS in a limited amount of statistics. Conclusions. The study showed that the developed model for calculating the quantitative criterion for assessing the security of ITS, using pairwise comparisons, allows experts to focus on the problem. In addition, the proposed model has a built-in quality criterion of the expert and allows to move from a qualitative assessment in the form of an ordered series of alphanumeric combinations, to a quantitative assessment in the form of the ratio of the basic security profile to the security profile defined by the expert.

**Keywords:** information and telecommunication systems; critical infrastructure; security assessment criterion; functional security profile.

# Applied problems of information systems operation

УДК 519.668:319.66

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.16>В. Ю. Дубницький<sup>1</sup>, А. М. Кобилін<sup>1</sup>, О. А. Кобилін<sup>2</sup>, Ю. І. Кушнерук<sup>3</sup><sup>1</sup> ННІ “Каразінський банківський інститут” ХНУ імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна<sup>2</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна<sup>3</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

## EXCEL – ОРІЄНТОВАНА ПРОЦЕДУРА ДЛЯ ОБЧИСЛЕННЯ ЗНАЧЕНЬ СПЕЦІАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ З ІНТЕРВАЛЬНИМ АРГУМЕНТОМ, ЗАДАНИМ В ГІПЕРБОЛІЧНІЙ ФОРМІ

**Анотація. Мета роботи.** Запропонувати основні положення EXCEL – орієнтованих процедур для обчислення значень елементарних і спеціальних функцій з інтервальним аргументом, заданим в гіперболічній формі. **Результати роботи.** Розглянуто способи подання інтервальних чисел в гіперболічній формі і правила виконання операцій додавання, віднімання, множення та ділення цих чисел. Описано процедури визначення чисельних значень функцій, аргументи яких можуть бути виродженими і інтервальними числами, а саме: прямих і обернених функцій прямокутної тригонометрії, прямих і обернених функцій гіперболічної тригонометрії, експоненціальної, довільної показникової і степеневі функції, Гамма - функції, неповної Гамма – функції, дигамма – функції, тригамма – функції, тетрагамма – функції, пентагамма – функції, Бета – функції і її частинних похідних, інтегральної показникової функції, інтегрального логарифма, ділогарифма, інтегралів Френеля, інтегрального синуса, інтегрального косинуса, інтегрального гіперболічного синуса, інтегрального гіперболічного косинуса. Запропоновано основні положення EXCEL – орієнтованих процедур для обчислення значень елементарних і спеціальних функцій з інтервальним аргументом, який заданий в гіперболічній формі. Наведено чисельні приклади, що ілюструють використання запропонованих методів.

**Ключові слова:** інтервальна арифметика; гіперболічна форма інтервального числа; спеціальні функції; чисельні методи.

### Вступ

Задачі обчислення значень елементарних і спеціальних функцій історично були одними з перших задач, розв’язаних на комп’ютерах [1]. З тієї пори і до сьогоднішнього дня вони залишаються актуальними тому, що методи їх розв’язання істотно залежать від безперервної зміни архітектури комп’ютерів. Детально ці методи розглянуто в роботах [2, 6, 8, 9, 17]. Головна особливість цих робіт, з погляду авторів даного повідомлення, в тому, що в них для проведення обчислень застосована традиційна евклідова арифметика. Використання інтервально визначених чисел у вказаних роботах не розглянуто. В роботі [7] розглянуто розв’язання задачі визначення значень елементарних і деяких спеціальних функцій у разі інтервально заданого аргументу, визначеного в системі ЦЕНТР – РАДІУС. В роботі [10] наведено відомості про систему комп’ютерної алгебри Math Partner, призначеної для виконання дій з інтервальними числами, які визначені відповідно до правил класичної і нестандартної інтервальної арифметики. Детальніше ця система описана в роботі [11].

Сьогодні обчислення значень багатьох видів спеціальних функцій, аргументи яких визначено у традиційній формі, входить у всі математичні пакети. В той же час номенклатура спеціальних функцій, які включені в систему EXCEL, обмежена обчисленням значень логарифма Гамма – функції і функцій Бесселя. Оскільки EXCEL є один з найбільш поширених пакетів, то завдання розширення його обчислювальних можливостей, на думку ав-

торів даного повідомлення, може бути важливим і актуальним. Це обумовлено тим, що авторам не вдалося знайти в доступній для них літературі опису способів застосування системи EXCEL для обчислення значень спеціальних функцій. Перелік функцій, обчислення значень яких розглянуто в даній роботі, багато в чому суб’єктивний. Він був визначений в результаті аналізу робіт [2, 3, 16], зручності програмної реалізації вибраних алгоритмів обчислення функцій в системі EXCEL, науковими інтересами авторів і їх досвіду, отриманого при виконанні роботи [7].

**Аналіз літератури.** Даний розділ складається з двох частин. У першій частині розглянуто використані в даному повідомленні способи обчислення значень спеціальних функцій, які описано в роботах [2,17,18,19]. Далі цю обставину буде використана за умовчанням. При описі способів обчислення значень функцій застосована їх класифікація, яку наведено в роботі [4]. У другій частині розглянуто особливості операцій з інтервальними числами в гіперболічній формі.

### Результати досліджень

**Способи обчислення значень спеціальних функцій.** Обчислення показникової і степеневі функції. До складу вбудованих функцій системи EXCEL входять функції СТЕПЕНЬ і EXP. Перша функція повертає результат піднесення числа в степінь, друга повертає значення експоненти. У подальшому викладі будуть використані наступні варіанти використання цих функцій:

$$y = \exp(x); \quad a^x = \exp(x \ln a); \quad x^a = \exp(a \ln x).$$

Обчислення значень основних функцій прямолінійної тригонометрії. У перелік вбудованих функцій системи EXCEL включено функції COS, SIN, TAN. Для обчислення функції  $y = \text{ctgx}$  слід обчислювати значення функції  $\text{ctgx} = 1/\text{tgx}$ .

Для обчислення значень обернених тригонометричних функцій слід використовувати вбудовані функції ACOS, ASIN, ATAN. Значення функцій  $\arccos x$   $\arcsin x$   $\arctg x$  визначають з виразами:

$$\arccos x = \pi/2 - \arcsin x, \quad \arcsin x = \pi/2 - \arctg x. \quad (1)$$

Обчислення значень основних функцій гіперболічної тригонометрії. Зведення про властивості гіперболічних функцій, які використані в цій роботі наведено в [20].

У перелік вбудованих функцій системи EXCEL включено функції COSH, SINH, TANH. Значення функції  $y = \text{cthx}$  визначають, використовуючи вираз

$$\text{cthx} = 1/\text{thx}. \quad (2)$$

Для обчислення значень обернених гіперболічних функцій слід використовувати вбудовані функції ACOSH, ASINH, ATANH.

Значення функції  $y = \text{Arcthx}$  визначають по за співвідношенням:

$$\text{Arcthx} = \text{Arth}(1/x). \quad (3)$$

Обчислення значень Гамма – функції і споріднених з нею функцій. У перелік вбудованих функцій системи EXCEL включена функція ГАММАНЛОГ, яка дозволяє обчислювати значення натурального логарифма Гамма – функції, яка визначається виразом:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt, \quad z > 0. \quad (4)$$

Отже, для визначення чисельного значення  $\Gamma(z)$  необхідно обчислити наступне значення :

$$\Gamma(z) = \exp[\ln \Gamma(z)]. \quad (5)$$

Обчислення значень неповної Гамма - функції. Основні визначення неповної Гамма – функції, зв'язки між ними і способи їх обчислення представлено в табл. 1. Використана в даній роботі процедура для обчислення неповної Гамма – функції відрізняється від використаної для цієї ж мети процедури, що описана в [7]. Ця заміна обумовлена тим, що застосована в нашому випадку процедура дає інтервал меншої ширини в порівнянні з [7] і зручніша для програмування обчислень в системі EXCEL, особливо при обчисленні функції  $\gamma^*(a, x)$ .

Обчислення значень Бета – функції. Бета – функцію  $B(z, w)$  визначають за співвідношенням:

$$B(z, w) = \int_0^1 t^{z-1} e^{-t} dt = B(w, z) = \frac{\Gamma(z)\Gamma(w)}{\Gamma(z+w)}. \quad (6)$$

З співвідношень : (5,6) отримаємо, що:

$$B(z, w) = \frac{\exp[\ln \Gamma(z) + \ln \Gamma(w)]}{\exp[\ln \Gamma(z+w)]}. \quad (7)$$

Обчислення значень полігамма – функцій. Розрахункові формули для визначення значень полігамма – функцій наведено в табл. 2.

Спосіб розрахунку чисельних значень частинних похідних Бета – функції наведений в табл. 3. Обчислення значень функції  $B(z, w)$  виконують відповідно за співвідношенням: (7), спосіб обчислення Псі – функції наведений в табл. 2.

Інтегральна показникова і споріднені з нею функції. До інтегральної показникової і споріднених з нею функцій у відповідності з роботою [4] відносять

Таблиця 1 – Обчислення значень неповної Гамма – функції

Вигляд неповної Гамма - функції			
	$\gamma(a, x)$	$\Gamma(a, x)$	$\gamma^*(a, x)$
Визначення	$\gamma(a, x) = \int_0^x e^{-t} t^{a-1} dt$	$\Gamma(a, x) = \int_x^{\infty} e^{-t} t^{a-1} dt$	$\gamma^*(a, x) = \frac{x^{-a}}{\Gamma(a)} \int_0^x e^{-t} t^{a-1} dt$
Обчислення	$\gamma(a, x) = x^a \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (x)^n}{n!(a+n)}$	$\Gamma(a, x) = \exp[\ln \Gamma(a)] - \gamma(a, x)$	$\gamma^*(a, x) = x^{-a} \frac{\gamma(a, x)}{\exp[\ln \Gamma(a)]}$

Таблиця 2 – Обчислення значень полігамма – функцій

Найменування функції	Визначення функції	Розрахункова формула
Дігамма – функція (Псі-функція)	$\psi(z) = \frac{d}{dz} \ln \Gamma(z)$	$\psi(z) = \ln z - \frac{1}{2z} - \frac{1}{12z^2} + \frac{1}{120z^4} - \frac{1}{252z^6}$
Тригамма- функція	$\psi'(z) = \frac{d^2}{dz^2} \ln \Gamma(z)$	$\psi'(z) = \frac{1}{z} + \frac{1}{2z^2} + \frac{1}{6z^3} - \frac{1}{30z^5} + \frac{1}{42z^7} - \frac{1}{30z^9}$
Тетрагамма - функція	$\psi''(z) = \frac{d^3}{dz^3} \ln \Gamma(z)$	$\psi''(z) = -\frac{1}{z^2} - \frac{1}{z^3} - \frac{1}{2z^4} + \frac{1}{6z^6} - \frac{1}{6z^8} - \frac{5}{6z^{12}}$
Пентагамма - функція	$\psi^{(3)}(z) = \frac{d^4}{dz^4} \ln \Gamma(z)$	$\psi^{(3)}(z) = \frac{2}{z^3} + \frac{3}{z^4} + \frac{2}{z^5} - \frac{1}{z^7} + \frac{4}{3z^9} - \frac{3}{z^{11}} + \frac{10}{z^{13}}$

Таблиця 3 – Обчислення значень частинних похідних Бета – функції

Визначення частинних похідних та розрахункові формули
$\frac{\partial}{\partial z} B(z, w) = B(z, w) \cdot [\psi(z) - \psi(z + w)]$
$\frac{\partial}{\partial w} B(z, w) = B(z, w) \cdot [\psi(w) - \psi(z + w)]$

інтегральну показникову функцію, інтегральний логарифм, ділогарифм, інтеграли Френеля, інтегральний синус і косинус, інтегральні гіперболічний синус і косинус.

Обчислення значень інтегральної показникової функції. Інтегральною показниковою функцією називають функцію виду:

$$Ei(x) = \int_{-\infty}^x e^t/t \, dx, \quad x < 0. \quad (8)$$

Для обчислення її значень використовується:

$$Ei(x) = C + \ln|x| + \sum_{k=1}^6 \frac{x^k}{k \cdot k!}, \quad x \neq 0. \quad (9)$$

У цьому виразі C – стала Ейлера, C = 0,57721. Значення величини  $(k \cdot k!)^{-1}$  наведено в табл.4. Обмеження на величину x в (9) обумовлено фізичним змістом задач, які розглядали автори.

Таблиця 4 – Значення коефіцієнтів  $(k \cdot k!)^{-1}$

Значення індексу k	Значення коефіцієнтів $(k \cdot k!)^{-1}$	Значення індексу k	Значення коефіцієнтів $(k \cdot k!)^{-1}$
1	1	4	0,01046
2	0,25	5	0,00166
3	0,05555	6	0,00231

Обчислення значень інтегрального логарифма. Інтегральним логарифмом називають функцію:

$$li(x) = \int_0^x \frac{dt}{\ln t} = Ei(\ln x), \quad 0 < x < 1, \quad x > 1. \quad (10)$$

Для обчислення її значень використовується співвідношення:

$$li(x) = C + \ln|\ln x| + \sum_{k=1}^6 \frac{x^k}{k \cdot k!}, \quad 0 < x < 1, \quad x > 1. \quad (11)$$

Значення коефіцієнтів  $(k \cdot k!)^{-1}$  наведено в табл. 4.

Обчислення значень ділогарифма. Ділогарифмом називають функцію:

$$Li_2(x) = -\int_0^x \frac{\ln(1-t)}{t} dt, \quad x \leq 1. \quad (12)$$

Значення цієї функції визначають таким чином:

$$Li_2(x) = \frac{x}{x+1} \left[ 3 + \sum_{k=1}^8 \frac{x^k}{k^2(k+1)^2} \right] - 2((x-1)/(x+1)) \ln(1-x), \quad x < 1. \quad (13)$$

Значення величин  $[k^2(k+1)^2]^{-1}$  наведено в табл. 5.

Таблиця 5 – Значення коефіцієнтів  $[k^2(k+1)^2]^{-1}$

Значення індексу k	Значення коефіцієнтів $[k^2(k+1)^2]^{-1}$	Значення індексу k	Значення коефіцієнтів $[k^2(k+1)^2]^{-1}$
1	0,25	5	0,00111
2	0,02777	6	0,00056
3	0,00694	7	0,00032
4	0,0025	8	0,00029

Обчислення значень інтегралів Френеля. Інтегралами Френеля називають інтеграли виду:

$$C(x) = \int_0^x \frac{\cos t}{\sqrt{t}} dt, \quad S(x) = \int_0^x \frac{\sin t}{\sqrt{t}} dt. \quad (14)$$

Степенеve розкладання цих функцій має вигляд:

$$C(x) = \sqrt{\frac{2x}{\pi}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k x^{2k}}{(2k)!(4k+1)}; \quad (15)$$

$$S(x) = \sqrt{\frac{2x}{\pi}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k x^{2k+1}}{(2k+1)!(4k+3)}$$

У даній роботі для виконання розрахунків прийняті наступні співвідношення:

$$C(x) = 0,79888\sqrt{x} \cdot \sum_{k=0}^3 a_k x^{2k}; \quad (16)$$

$$S(x) = 0,79888\sqrt{x} \cdot \sum_{k=0}^3 b_k x^{2k+1}.$$

Значення коефіцієнтів  $a_k, b_k$  наведено в табл. 6.

Таблиця 6 – Значення коефіцієнтів для визначення значень функцій C(x) і S(x)

Коефіцієнти $a_k$		Коефіцієнти $b_k$	
Значення індексу k	Значення коефіцієнтів	Значення індексу k	Значення коефіцієнтів
0	1	0	0,33333
1	-0,1	1	-0,02381
2	0,00463	2	0,00075
3	-0,00011	3	-1,32275·10 <sup>-5</sup>

Обчислення значень інтегрального синуса і інтегрального косинуса. Визначення цих функцій та їх степенеve розкладання наведено в табл. 7.

Обчислення значень інтегрального гіперболічного синуса і інтегрального гіперболічного косинуса. Визначення цих функцій та їх степенеve розкладання наведено в табл. 8. Значення перших чотирьох коефіцієнтів степеневого розкладання цих функцій наведено в табл. 9 та 10.

Способи подання інтервальних чисел. Визначення інтервального числа надано в роботах [12,16]. У роботах [12,14] описано дії з інтервальними числами в класичній формі.

Таблиця 7 – Степене розкладання інтегрального синуса і інтегрального косинуса

Найменування функції	Визначення функції	Степене розкладання
Інтегральний синус	$Si(x) = \int_0^x \frac{\sin t}{t} dt$	$Si(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k x^{2k+1}}{(2k+1) \cdot (2k+1)!}$
Інтегральний косинус	$Ci(x) = \int_0^x \frac{\cos t}{t} dt$	$Ci(x) = C + \ln x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k x^{2k}}{2k \cdot (2k)!}$

Таблиця 8 – Степене розкладання інтегрального гіперболічного синуса і інтегрального гіперболічного косинуса

Найменування функції	Визначення функції	Степене розкладання
Інтегральний гіперболічний синус	$Shi(x) = \int_0^x \frac{\sinh t}{t} dt$	$Shi(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^{2k+1}}{(2k+1) \cdot (2k+1)!}$
Інтегральний гіперболічний косинус	$Chi(x) = \int_0^x \frac{\cosh t}{t} dt$	$Chi(x) = C + \ln x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{x^{2k}}{2k \cdot (2k)!}$

Таблиця 9 - Значення коефіцієнтів степеневого розкладання інтегрального синусу і інтегрального косинусу

Значення індексу $k$	Значення коефіцієнтів степеневого розкладання інтегрального синусу, $(-1)^k [(2k+1) \cdot (2k+1)!]^{-1}$	Значення коефіцієнтів степеневого розкладання інтегрального косинусу, $(-1)^k [2k \cdot (2k)!]^{-1}$
1	-0,05555	-0,25
2	0,00166	0,01041
3	$2,83446 \cdot 10^{-6}$	-0,00041
4	-	$3 \cdot 10^{-6}$

Таблиця 10 – Значення коефіцієнтів степеневого розкладання інтегрального гіперболічного синусу і інтегрального гіперболічного косинусу

Значення індексу $k$	Значення коефіцієнтів степеневого розкладання інтегрального синусу $[(2k+1) \cdot (2k+1)!]^{-1}$	Значення коефіцієнтів степеневого розкладання інтегрального косинусу $[2k \cdot (2k)!]^{-1}$
1	0,05555	0,25
2	0,00166	0,01041
3	$2,83446 \cdot 10^{-6}$	0,00041
4	-	$3 \cdot 10^{-6}$

У роботі [15] описано дії з інтервальними числами представленими в ЦЕНТР - РАДІУС, в роботі [16] викладено властивості інтервальних чисел в гіперболічній формі. В роботі [7] наведено відомості щодо спеціалізованого програмного калькулятора, який використовує інтервальні числа в системі ЦЕНТР - РАДІУС. У роботі [10] надано опис програмного продукту, який використовує представлення інтервальних чисел в нестандартній формі. Особливості цього способу наведено в роботі [13]. Використання інтервальних чисел для розв'язання інженерних задач наведено в роботі [21].

В класичній формі інтервальне число  $[A]$  визначають на множині дійсних чисел  $R$  у вигляді замкнутого інтервалу. Згідно з цією роботою визна-

чимо інтервальне число  $A$  у вигляді замкнутого інтервалу:

$$[A] = (a_1, a_2), \quad a_1 \leq a_2. \quad (17)$$

Якщо  $a_1 = a_2$  таке інтервальне число називають виродженим. Приклад виродженого інтервального числа – стала величина. У роботі [15] описаний спосіб представлення інтервальних чисел в системі ЦЕНТР - РАДІУС. У цій системі інтервальне число  $\langle A \rangle$  має наступний вигляд:

$$A = \langle a, r_a \rangle, \quad (18)$$

де 
$$a = \frac{a_1 + a_2}{2}, \quad r_a = \frac{a_2 - a_1}{2}. \quad (19)$$



В [16] запропонована гіперболічна форма представлення інтервального числа. У цій роботі запропоновано інтервальне число  $x$  записувати у вигляді:

$$x = \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi). \quad (20)$$

У співвідношенні (20) прийнято, що  $\theta$  – спеціальний символ. За умовчанням вважають, що  $\theta^2 = 1$ . Модулем гіперболічного інтервального числа називають величину:

$$\mu(x) = a^2 - r_a^2. \quad (21)$$

В даній роботі прийнято, що  $r_a < |a|$ . Величину  $\rho$  називають гіпермодулем, величину  $\phi$  – аргументом гіперболічного інтервального числа. Величини  $\rho$  і  $\phi$  визначають за співвідношеннями:

$$\rho = \sqrt{\mu(x)}, \quad \phi = \frac{1}{2} \ln \frac{a+r_a}{a-r_a} = \frac{1}{2} \ln \frac{a_2}{a_1}. \quad (22)$$

Використовуючи співвідношення (18) і (19) отримаємо:

$$\mu(x) = \left(\frac{a_1+a_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{a_1-a_2}{2}\right)^2 = a_1 a_2. \quad (23)$$

Отже, інтервальне число  $x$  можна визначити як  $x = f(\rho, \phi)$ . Зв'язки між різними формами подання інтервальних чисел, які розглянуті в даній роботі, наведено в табл. 11.

Розглянемо чисельний приклад: перейти від інтервального числа в класичній формі  $[A] = (a_1, a_2) = (7, 11)$  до його подання в гіперболічній формі.

Таблиця 11 - Зв'язки між різними формами представлення інтервальних чисел

Форми подання інтервальних чисел	Форми подання інтервальних чисел		
	Класична, $[A] = (a_1, a_2)$	Система ЦЕНТР-РАДІУС, $\langle A \rangle = \langle a, r_a \rangle$	Гіперболічна, $x = f(\rho, \phi)$
Класична, $[A] = (a_1, a_2)$	$[A] = (a_1, a_2)$	$[A] = (a - r_a, a + r_a)$	$[A] = (\rho[ch\phi - sh\phi], \rho[ch\phi + sh\phi])$
Система ЦЕНТР-РАДІУС, $\langle A \rangle = \langle a, r_a \rangle$	$\langle A \rangle = \left\langle \frac{a_1+a_2}{2}, \frac{a_2-a_1}{2} \right\rangle$	$\langle A \rangle = \langle a, r_a \rangle$	$\langle A \rangle = \langle \rho \cdot ch\phi, \rho \cdot sh\phi \rangle$
Гіперболічна, $x = f(\rho, \phi)$	$[A] = (\sqrt{a_1 a_2} ch(\phi), \sqrt{a_1 a_2} sh(\phi))$ $\phi = \ln(a_2/a_1)/2$	$\langle A \rangle = \sqrt{a^2 - r_a^2} \cdot (ch\phi + \theta \cdot sh\phi)$ $\phi = \ln((a+r_a)/(a-r_a))/2$	$x = \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi)$

Послідовно використовуючи вирази (23), (22) отримаємо:

$$\rho = \sqrt{7 \cdot 11} = 8,77496 \rightarrow$$

$$\phi = \frac{1}{2} \ln \frac{11}{7} = 0,22599.$$

У гіперболічній формі це число прийме вигляд:  
 $x = 8,77496 \cdot (ch(0,22599) + \theta \cdot sh(0,22599)).$

Представимо отримане число  $[A]$  у формі числа, визначеного в системі ЦЕНТР – РАДІУС:

$$\begin{aligned} \langle A \rangle &= \langle \rho \cdot ch\phi, \rho \cdot sh\phi \rangle = \\ &= \left\langle 8,77496 \cdot ch(0,22599); \right. \\ &= \left. \left. \left. 8,77496 \cdot sh(0,22599) \right\rangle = \langle 9, 2 \rangle. \right. \end{aligned}$$

Отже, одержимо початкове число  $[A] = (7, 11)$ .

Далі, для скорочення, будемо вживати термін «гіперболічне число» маючи на увазі під цим «інтервальне число, визначене в гіперболічній формі».

**Постановка завдання.** Розробка основних положень EXCEL – орієнтованих процедур для обчислення значень елементарних і спеціальних функцій з інтервальним аргументом, заданим в гіперболічній формі.

### Отримані результати

Спираючись на результати роботи [16] та результати, отримані авторами операції додавання, віднімання, ділення і множення гіперболічних чисел слід виконувати наступним чином.

Операцію складання гіперболічних чисел:

$$x = \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi);$$

$$y = \delta(ch\psi + \theta \cdot sh\psi)$$

слід виконувати за правилом:

$$x + y = (\rho \cdot ch\phi + \delta \cdot ch\psi) + \theta(\rho \cdot sh\phi + \delta \cdot sh\psi). \quad (24)$$

У роботі [16] показано, що для кожного гіперболічного числа вигляду  $x = \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi)$  існує протилежне число вигляду

$$-x = \rho((-ch\phi) + \theta \cdot (-sh\phi)).$$

Таким чином, операцію віднімання гіперболічних чисел слід виконувати за правилом:

$$\begin{aligned} x - y &= x + (-y) = \\ &= (\rho \cdot ch\phi - \delta \cdot ch\psi) + \theta(\rho \cdot sh\phi - \delta \cdot sh\psi). \end{aligned} \quad (25)$$

Операцію множення двох гіперболічних чисел слід виконувати таким чином.

$$x \cdot y = \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi) \cdot \delta(ch\psi + \theta \cdot sh\psi). \quad (26)$$

Розкриваючи у виразі (26) дужки і використовуючи формули [20, С.18], отримуємо, що:

$$\begin{aligned} x \cdot y &= \\ &= \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi) \cdot \delta(ch\psi + \theta \cdot sh\psi) = \\ &= \rho\delta((ch(\phi + \psi) + \theta \cdot sh(\phi + \psi))). \end{aligned} \quad (27)$$

У роботі [16] показано, що для кожного гіперболічного числа

$$x = \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi)$$

існує обернене число:

$$\begin{aligned} x^{-1} &= (\rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi))^{-1} = \\ &= \frac{1}{\rho}(ch(-\phi) + \theta \cdot sh(-\phi)). \end{aligned} \quad (28)$$

Отже, операцію ділення двох гіперболічних чисел, використовуючи вирази (27), (28) необхідно виконувати таким чином:

$$\begin{aligned} \frac{x}{y} &= \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi) \cdot \frac{1}{\delta}(ch(-\psi) + sh(-\psi)) = \\ &= \frac{\rho}{\delta}(ch(\phi - \psi) + \theta \cdot sh(\phi - \psi)). \end{aligned} \quad (29)$$

У роботі [22, С.215] приведений такий вираз:

$$(ch\phi \pm sh\phi)^n = ch(n\phi) \pm sh(n\phi). \quad (30)$$

Отже отримуємо:

$$x^n = (\rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi))^n = \rho^n(ch(n\phi) + \theta \cdot sh(n\phi)). \quad (31)$$

Розглянемо сталу величину  $C$ . У формі класичного інтервального числа величина  $[C] = (c_1, c_1)$ . Відповідно до (20...22) отримуємо:

$$\rho = \sqrt{c^2} = c, \quad \phi = \frac{1}{2} \ln \frac{c}{c} = 0. \quad (32)$$

Для додавання (віднімання) сталої величини  $c$  і гіперболічного числа  $x$  за співвідношенням: (24), (25), отримуємо:

$$\begin{aligned} c \pm x &= c(ch(0) + \theta \cdot sh(0)) \pm \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi) = \\ &= (c \pm \rho \cdot ch\phi) \pm \theta \cdot sh(\phi). \end{aligned} \quad (33)$$

Для множення сталої величини  $c$  на гіперболічне число  $x$  за співвідношенням (27) отримуємо:

$$\begin{aligned} cx &= c(ch(0) + \theta \cdot sh(0)) \cdot \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi) = \\ &= c\rho \cdot (ch(0 + \phi) + \theta \cdot sh(0 + \phi)) = \\ &= c\rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi). \end{aligned} \quad (34)$$

Для операції ділення розглянемо два варіанти операції. У першому варіанту, за співвідношенням (29) отримуємо:

$$\begin{aligned} \frac{x}{c} &= \frac{\rho(ch\phi + \theta \cdot ch\phi)}{c \cdot (ch(0) + \theta \cdot sh(0))} = \\ &= \frac{\rho}{c}(ch(\phi - 0) + \theta \cdot sh(\phi - 0)) = \frac{\rho}{c}(ch\phi + \theta \cdot sh\phi). \end{aligned} \quad (35)$$

У другому варіанту, за співвідношенням (26) маємо:

$$\begin{aligned} \frac{c}{x} &= \frac{c \cdot (ch(0) + \theta \cdot sh(0))}{\rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi)} = \\ &= \frac{c}{\rho}(ch(0 - \phi) + \theta \cdot sh(0 - \phi)). \end{aligned} \quad (36)$$

Зважаючи на те, що  $ch\phi$  функція парна, а  $sh\phi$  непарна, отримуємо:

$$\frac{c}{x} = \frac{c}{\rho}(ch(-\phi) + \theta \cdot sh(-\phi)) = \frac{c}{\rho}(ch\phi - \theta \cdot sh\phi). \quad (37)$$

Порівняння деяких форм подання інтервальних чисел між собою автори частково виконали в роботах [7, 23]. У цих роботах автори порівнювали результати обчислення, в яких інтервальні числа було представлено в класичній формі, нестандартній і в системі ЦЕНТР-РАДІУС. Порівняння цих способів подання інтервальних чисел із запропонованим в даному повідомленні способом дозволяє зробити висновок про те, що визначення інтервального числа в гіперболічній формі має переваги у порівнянні з вищевказаними способами. Подання інтервального числа в гіперболічній формі спрощує програмування операцій множення, ділення і піднесення до цілочисельного ступеня. Особливо ці переваги виявляються при дії з інтервальними числами, межі інтервалів яких розташовані по різну сторону від початку числової осі

У роботі [7] проведена оцінка точності результатів обчислення значень основних елементарних функцій і деяких спеціальних функцій. У табл. 11 наведені результати обчислення значень інтегрального косинуса, інтегральній показовій функції і три гамма-функції.

Таблиця 11. Табличні і інтервальні значення інтегрального синусу інтегральної показової функції та триганма - функції

Вид функції та значення її аргументу	Табличне значення функції	Значення інтервального аргументу	Інтервальне значення функції
$Si(0,54)$	0,53132	(0,53; 0,55)	(0,51911; 0,54454)
$Ei(0,61)$	0,59752	(0,6; 0,62)	(0,58614; 0,60691)
$\psi'(1,045)$	0,97594	(1,040; 1,050)	(0,97615; 0,97280)

Порівнюючи табличні значення функцій, отриманих при використанні вироджених аргументів з їх

значеннями, наведеними в роботі [2] і отриманими при використанні аргументів, що визначені в інтер-

вальному вигляді, можна зробити висновок про те, що застосування інтервальних обчислень дозволяє набувати не тільки значень функцій з достатньою для практичного застосування точністю, але і одночасно оцінювати похибку отриманих результатів обчислень. Остання обставина, на думку авторів даного повідомлення, робить їх застосування доцільним в тих випадках, коли аргументи функцій отримують в результаті експериментальних спостережень

Реалізація запропонованих у даній роботі обчислювальних методів виконана на мові програмування VBA (Visual Basic for Applications) в середовищі MS Excel 2017 з розробкою макросів для розв'язання відповідних завдань.. Обчислення можна виконувати у трьох варіантах.

Перший варіант використовує класичну інтервальну математику [12,14].

Другий варіант використовує інтервальну математику, в якій інтервали представлено в системі ЦЕНТР – РАДИУС [7,15].

Третій варіант використовує інтервальні числа в гіперболічній формі.

Для виконання унарних операцій, які вбудовано в систему EXCEL, рекомендовано використовувати класичну інтервальну математику. Для виконання бінарних операцій рекомендовано використовувати інтервальні числа в гіперболічній формі.

## Висновки

1. Запропоновано основні положення EXCEL – орієнтованих процедур для обчислення значень елементарних і спеціальних функцій з інтервальним аргументом, заданим в гіперболічній формі.

2. Розглянуто способи подання інтервальних чисел в гіперболічній формі і правила виконання операцій додавання, віднімання та множення цих чисел.

3. Отримано правило виконання операції ділення цих чисел.

4. Описано процедури визначення значень числами: прямих і обернених функцій прямолінійної тригонометрії, прямих і обернених функцій гіперболічної тригонометрії, експоненціальної, довільної показникової і степеневої функції, Псі- функції, тригамма – функції, тетрагамма – функції, пентагамма – функції, Бета – функції і її частинних похідних, інтегральної показникової функції, інтегрального логарифма, ділогарифма, інтегралів Френеля, інтегрального синуса, інтегрального косинуса, інтегрального гіперболічного синуса, інтегрального гіперболічного косинуса.

5. Наведено чисельні приклади, що ілюструють запропоновані методи і виконаний аналіз їх точності.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Carlson B., Goldstein M. Rational approximation of functions. Los Alamos Scientific Laboratory LA-1943, 1955.
- Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами. Под ред. М. Абрамовица и И. Стигана. Москва: Наука, 1979. 832 с.
- Люстерник Л.А., Червоненкис О.А., Янпольский А.Р. Математический анализ: Вычисление элементарных функций. Москва, 1963. 248 с.
- Попов Б. А., Теслер Г.А. Вычисление функций на ЭВМ. Киев: Наукова думка, 1984. 599 с.
- Кошаровский А.Н. Разработка и исследование алгоритмов и процессоров вычисления значений элементарных функций: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Москва, Московский энергетический институт, 2000. 179 с.
- Сальников М.С. Рекурсивный алгоритм вычисления логарифма. *Информационные процессы*. 2012. № 3, Т. 12. С. 248-252.
- Дубницкий В. Ю., Кобылин А. М., Кобылин О. А. Вычисление значений элементарных и специальных функций с интервально заданным аргументом, определённым в системе ЦЕНТР – РАДИУС. *Прикладная радиоэлектроника*. 2017. №3, 4. Том 16. С. 147-154.
- Кулямин В. Формальные подходы к тестированию математических функций. *Труды института системного программирования*. 2006. Вып. 10. С. 69-114.
- Чернов Е.С, Кулямин В.В.. Тестирование современных библиотек тригонометрических функций. *Труды Института системного программирования РАН*. Том 14, часть 1, 2008. С. 161-178.
- Буряченко С. П. Программный комплекс для работы с интервальными числами. *Державинский форум*. 2019. Т. 3. № 10. С. 161-167.
- Малашонок Г.И. Руководство по языку «МАТНРА». Тамбов: Издательский дом Тамбовского Государственного Университета им. Г.Р. Державина, 2013. 132 с.
- Алефельд Г. Введение в интервальные вычисления. Москва: Мир. 1987. 360 с.
- Калмыков С. А., Шокин Ю. И., Юлдашев З. Х. Методы интервального анализа. Новосибирск: Наука. 1986. 223 с.
- Шарый С.П. Конечномерный интервальный анализ. Новосибирск: Издательство «ХYZ», 2012. 606 с.
- Жуковська, О.А. Основи інтервального аналізу: навчальний посібник. Київ: Освіта України, 2009. 136 с.
- Молодцов, Д.А. и Ковков, Д.В. Введение в теорию приближенных чисел. *Вестник Тверского Государственного Университета. Серия: Прикладная математика*. 2011. 23. С. 111-128.
- Цимринг Ш. Е. Специальные функции и определенные интегралы. Алгоритмы. Программы для микрокалькуляторов: Справочник. Москва: Радио и связь. 1988. 272 с.
- Бейтмен Р., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. Функции Бесселя, функции параболического цилиндра, ортогональные многочлены. Москва: НАУКА, 1974. 296 с.
- Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. Формулы, графики, таблицы. Москва: НАУКА, 1964. 344 с.
- Янпольский А.Р. Гиперболические функции. Москва: НАУКА, 1960. 195 с.
- Дубницкий В.Ю., Кобылин А.М., Кобылин О.А. Вычисление индикаторов подобия и численное интегрирование критериев подобия интервально определённых в системе ЦЕНТР-РАДИУС. *Сучасні інформаційні системи*, 2019. Т.3, №3. С. 55 – 62. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.3.07>

22. Бронштейн Н.И. Семендяев, К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗОВ. Под ред Г.Гроше и В. Циглера. Наука, 1981. 718 с.
23. Дубницький В.Ю., Кобилін А.М., Кобилін О.А. Виконання на мобільних пристроях арифметичних операцій з використанням аксіом класичного та нестандартного інтервального аналізу. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Т. 5, № 3. С. 128-136. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.17>

Received (Надійшла) 22.09.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.11.2021

## ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Дубницький Валерій Юрійович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник ННІ “Каразінський банківський інститут” ХНУ ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна;

**Valeriy Dubnitskiy** – Candidate of Technical Sciences, Senior Research, Senior Research of “Karazin Banking Institute” of V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [dubnitskiy@gmail.com](mailto:dubnitskiy@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1924-4104>.

**Кобилін Анатолій Михайлович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та математичного моделювання, ННІ “Каразінський банківський інститут” ХНУ ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна;

**Anatolii Kobylin** – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Associate professor of “Karazin Banking Institute” of V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [anatoliy\\_kam@ukr.net](mailto:anatoliy_kam@ukr.net); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8083-0762>.

**Кобилін Олег Анатолійович** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Oleg Kobylin** – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Head of the Department of Informatics, Kharkiv National University of RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [oleg.kobylin@gmail.com](mailto:oleg.kobylin@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0834-0475>.

**Кушнерук Юрій Іонович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

**Yuriy Kushneruk** – Candidate of Technical Sciences Associate Professor, Senior Lecturer of Ivan Kozhedub ,Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

e-mail: [yuriy.kushneruk@gmail.com](mailto:yuriy.kushneruk@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5844-7137>.

**EXCEL – ориентированная процедура для вычисления значений специальных функций с интервальным аргументом, заданным в гиперболической форме**

В. Ю. Дубницький, А. М. Кобилін, О. А. Кобилін, Ю. И. Кушнерук

**Аннотация. Цель работы.** Предложить основные положения EXCEL – ориентированных процедур для вычисления значений элементарных и специальных функций с интервальным аргументом, заданным в гиперболической форме. **Результаты работы.** Рассмотрены способы представления интервальных чисел в гиперболической форме и правила выполнение операций сложения, вычитания, умножения и деления этих чисел. Описаны процедуры определения числовых значений функций, аргументы которых могут быть вырожденными и интервальными числами, а именно: прямых и обратных функций прямолинейной тригонометрии, прямых и обратных функций гиперболической тригонометрии, экспоненциальной, функции, произвольной показательной функции и степенной функции, Гамма- функции, неполной Гамма – функции, дигамма-функции, тригамма – функции, тетрагамма– функции, пентагамма – функции, Бета – функции и ее частных производных, интегральной показательной функции, интегрального логарифма, дилогарифма, интегралов Френеля, интегрального синуса, интегрального косинуса, интегрального гиперболического синуса, интегрального гиперболического косинуса. Предложены основные положения EXCEL – ориентированных процедур для вычисления значений элементарных и специальных функций с интервальным аргументом, заданным в гиперболической форме. Приведены численные примеры, которые иллюстрируют использование предложенных методов

**Ключевые слова:** интервальная арифметика; гиперболическая форма интервального числа; специальные функции; численные методы.

**EXCEL-orientated procedure for calculating the values of special functions with interval argument assigned on the hyperbolic form**

Valeriy Dubnitskiy, Anatolii Kobylin, Oleg Kobylin, Yuriy Kushneruk

**Abstract. Aim of the work** is to propose the main terms of the EXCEL-orientated procedures for calculating the values of elementary and special functions with interval argument that is assigned on the hyperbolic form. **The results of the work.** The methods of presenting the interval values in the hyperbolic form and the rules of addition, subtraction, multiplication, and division of this values were considered. The procedures of calculating the function values, whose arguments can be degenerate or interval values were described. Namely, the direct and the reverse functions of the linear trigonometry, the direct and the reverse functions of the hyperbolic trigonometry, exponential function, arbitrary exponential function and power function, Gamma-function, incomplete Gamma-function, digamma-function, trigamma-function, tetragamma-function, pentagamma-function, Beta-function and its partial derivatives, integral exponential function, integral logarithm, dilogarithm, Frenel integrals, sine integral, cosine integral, hyperbolic sine integral, hyperbolic cosine integral. The basic terms of the EXCEL-orientated procedures for calculating the values of elementary and special functions with interval argument that is assigned on the hyperbolic form were proposed. The numerical examples were provided, that illustrate the application of the proposed methods.

**Keywords:** interval arithmetic; hyperbolic form of the interval value; special functions; numerical methods.

В. М. Канцедал, А. А. Могила

Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України, Харків, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ ЦІЛЕПОКЛАДАННЯ ПРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ РЕЖИМІВ ЗОНДУВАННЯ ОГЛЯДОВОЇ РЛС В ПРОЦЕСІ ЇХ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ПРИДУШЕННЯ

**Анотація.** Розглядаються особливості управління цілепокладанням при забезпеченні інформаційної стійкості режимів зондування оглядової РЛС при її придушенні активними завадами та інформаційними впливами, що заважають. Подолання складності процесів цілепокладання, обґрунтованості та оперативності прийняття рішень при дефіциті часу на його прийняття пов'язані із забезпеченням системності процесів цілепокладання, підвищенням рівнів їх інтелектуалізації та формалізації. Це сприятиме наданню бажаних властивостей багатопільовим стратегіям та ситуаційному закону управління процесами РЕЗ та координації дій, що синтезуються в ході конфлікту. Особливості подолання складності вирішуваної проблеми пов'язані з системністю процесів цілепокладання, підвищенням їх рівнів інтелектуалізації та формалізації. Підвищення рівня інтелектуалізації процесів цілепокладання забезпечується: декомпозицією загальної задачі цілепокладання на окремі більш прості підзадачі з ефективними рішеннями, які реалізуються у відповідних підсистемах САУуст (або базових об'єднаннях її функціональних елементів) на етапах інформаційного забезпечення, підготовки, прийняття та реалізації рішень на ієрархічних рівнях управління; когнітивним аналізом цілей та рефлексивним синтезом процесів цілепокладання з залученням можливостей спеціалізованої інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для посилення креативно-рефлексивних здібностей суб'єкта управління та підвищення рівня його професійних компетенцій; поєднанням універсальності етапів раціональних управління синтезом стратегії управління процесами РЕЗ зі специфікою конфліктних ситуацій, суб'єктивністю, когнітивним та рефлексивним характером інтелектуального управління. Представлені способи та засоби часткової формалізації процесів цілепокладання, коли структурування головної мети проводиться з урахуванням належності до стратегій внутрішнього та зовнішнього управління РЕЗ, декомпозиції 2-хсторонньої динамічної моделі конфлікту між системами комплексу РЕП і РЛС, ієрархії рівнів управління, застосованих різних підходів до цілепокладання і кризового управління в цілому, а також методів обґрунтування цілей, витрат ресурсів та і контролю якості досягнення поставлених цілей. Ці особливості дозволяють істотно понизити ступінь суб'єктивності керуючих рішень щодо цілепокладання, і домогтися їх обґрунтованості, повноти, несуперечності та узгодженості.

**Ключові слова:** система управління; конфліктна ситуація; невизначеність; стійкість; цілепокладання; прийняття рішень; радіоелектронний захист.

### Вступ

Розглядаються особливості кризового управління інформаційною стійкістю режимів зондування оглядової РЛС в умовах їх радіоелектронного придушення (РЕП) повітряним комплексом РЕП із застосуванням керованих активних завад та інформаційних впливів, що заважають. Завадозахищеність режимів зондування РЛЗ при цьому істотно залежить не тільки від якості застосовуваних конкретних способів і засобів радіоелектронного захисту (РЕЗ), умов їх застосування, а й від властивостей управління їх застосуванням. Оскільки з часом склад та зміст конфліктних ситуацій (КС) змінюється, уточнюється знання про стратегію комплексу РЕП в рамках двохсторонньої моделі динамічного конфлікту між комплексом РЕП та РЛС, то це робить необхідним синтез закону управління процесами РЕЗ та координації дій у ході конфлікту. Особливістю динамічної моделі конфліктної взаємодії є те, що стратегії придушення РЛС активними завадами та її РЕЗ від загроз їх впливу супроводжуються інформаційним протиборством, а також можливістю зміни динамічного стану КС внутрішнім та зовнішнім керуванням [1-7, 13].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Інформаційна стійкість є об'єктом управління (ОУ) у структурі спеціалізованої системи автоматизованого управління САУ<sub>ст</sub> [5-7]. На практиці опис стратегії РЕЗ обмежуються можливостями контуру стратегій

внутрішнього реактивного управління засобами РЕЗ від загроз впливу активних завад [2, 8]. Ці стратегії характеризуються як ресурс витратні, коли кожній загрозі протиставляється засіб РЕЗ чи їх набір. Управління здійснюється суб'єктом управління за даними системи аналізу лише сигнально-завадової обстановки, використовуючи правило «якщо..., то...». У цьому управлінні домінують інформаційні дані, зокрема інформаційні впливи, що заважають. Потрібно вдосконалення її структури, щоб вона могла синтезувати в динаміці конфлікту адекватні загрозам стратегії управління засобами РЕЗ із бажаними властивостями, виробляти більш обґрунтовані та оперативні керуючі рішення при дефіциті часу на ухвалення рішення та суб'єктивності кризового управління.

Інформаційні впливи, які пов'язані з прихованою та активною зміною динамічного стану КС для отримання конфліктної переваги, реалізується в контурі стратегій зовнішнього управління пропонованої структури САУуст. Вони спрямовані на порушення функціонування систем радіотехнічної розвідки та управління (СРТР – САУ<sub>РЕП</sub>), управління та радіоелектронного придушення (САУ<sub>РЕП</sub> – СРЕП) комплексу РЕП. Це досягається введенням суб'єкта їх управління, алгоритмів прийняття рішення на оману помилковими інформаційними впливами та психологічним тиском, нав'язуванням системам поведінки, необхідної для підвищення ефективності САУ<sub>ст</sub>. Тобто, специфіка стратегій зовнішнього управління

полягає у постановці нестандартних цілей певної спрямованості та виділенні відповідного ресурсу для їх досягнення. Це вимагає системно-процесного, когнітивного підходу до управління та застосування рефлексивної форми управління, що спирається на знання про стратегії управління РЕП та РЕЗ, високий рівень професійних компетенцій суб'єкта управління, а також наявності в структурі САУ<sub>ст</sub> контуру інтелектуального управління у складі контурів внутрішнього та внутрішнього управління.

Зауважимо, що кризове управління інформаційною стійкістю режимів зондування характеризується:

- боротьбою з небезпечними загрозами стратегії РЕП, яка здебільшого спирається на досвід застосування способів і засобів РЕЗ та його узагальнення при внутрішньому управлінні у САУ<sub>ст</sub>;
- можливістю отримання конфліктної переваги за рахунок створення умов не тільки для нормальної роботи режимів РЛС, але й для більш ефективної роботи засобів радіоелектронного маскування (РЕМ), РЕЗ, інформаційного протидіювання та нестандартних процедур керування ними.

Тобто, одним із важливих напрямів удосконалення САУ<sub>ст</sub> є управління цілепокладання процесів РЕЗ з мінімізацією його помилок. Прорахунки цілепокладання, що виявляються на етапі реалізації управлінських рішень, не дозволяють [10,11] досягти висунутих цілей, вирішити поставлені завдання управління, тягнуть додаткові витрати ресурсів на досягнення несвочасно усвідомлених помилкових цілей. Причиною є складність конфліктних процесів, часткова формалізація процесу цілепокладання, ряд етапів якого ґрунтується на суб'єктивних моделях, інтуїтивних методах та здоровому глузді суб'єкта управління. Фрагментарність і автономність формалізації при системному характері процесів цілепокладання, істотна вага суб'єктивного компонента є передумовами недостатньої обґрунтованості та узгодженості результатів окремих етапів цілепокладання, які позначаються на якості прийнятих на їх основі рішень. Тому важливо для підвищення ефективності САУ<sub>ст</sub> розглянути особливості процесів аналізу покладання і синтезу досягнення цілей, а також логіки послідовності їх застосування під час побудови стратегії управління процесами РЕЗ.

Питанням часткової формалізації та інтелектуалізації процесів управління, зокрема цілепокладання для підвищення обґрунтованості та оперативності керуючих рішень, зниження впливу суб'єктивності цілепокладання присвячено ряд робіт у різних предметних областях, наприклад [10, 11, 18, 20]. Разом з тим, існує потреба в результатах системного аналізу особливостей процесів цілепокладання при забезпеченні інформаційної стійкості режимів зондування оглядової РЛС у зазначених умовах її РЕП.

Все це робить актуальним удосконалення структури САУ<sub>ст</sub>, моделей та засобів процесів цілепокладання при виробленні рішень кризового управління та оцінці їх результатів, що є важливим не лише науковим, а й практичним завданням.

**Метою статті** є виявити основні особливості способів та засобів управління процесами цілепокладання в спеціалізованій системі управління (САУ<sub>ст</sub>),

що сприяють підвищенню та забезпеченню інформаційної стійкості режимів зондування оглядової РЛС в умовах її придушення керованими активними завданнями та заважаючими інформаційними впливами, які дозволяють надати синтезованим під час конфлікту стратегіям і закону управління процесами РЕЗ та координації дій бажаних властивостей.

### Виклад основного матеріалу

**Постановка задачі.** Під інформаційною стійкістю режимів зондування РЛС у проблемних областях (секторах спостереження) зони огляду РЛС для різних етапів радіолокаційної розвідки повітряних цілей розуміється [2,8,9] їх властивість здійснювати необхідні перетворення ехосигналів, радіолокаційної інформації (РЛІ) при впливі факторів нестабільності, зберігати вихідні реакції у межах допусків, встановлених тактико-технічними вимогами.

Проблемні області - це області у зоні огляду РЛС, котрим характерні стійкі особливості перебігу конфліктної взаємодії, яка пов'язана з конкретним режимом зондування на етапах розвідки повітряної мети і динамічним станом КС.

Чинники нестабільності породжуються: комплексом РЕП; зміною: проблемних областей зони огляду РЛС, що відрізняються динамічним станом КС, різноманітністю видів і параметрів впливів, що заважають; КС; режимів зондування РЛС на етапах розвідки повітряних цілей; цілей і критеріїв ефективності управління; прийняттям суб'єктом управління неправильних керуючих рішень. При зміні режимів зондування потрібно, щоб час перехідного процесу, викликаного керуючою дією, було значно меншим, ніж інтервал стабільної роботи поточного зондування. Це дозволяє не накладати обмеження на можливість зміни режиму зондування.

Процес цілепокладання представляється як сукупність циклічних поступальних дій, пов'язаних з виявленням проблем, пошуком рішень та організацією їх виконання у певних умовах за наявних ресурсів. Сенс цілепокладання при цьому полягає в обґрунтуванні та постановці цілей для подолання проблеми, що виникла, а також в виборі шляхів досягнення поставлених цілей з контролем відхилення фактичних цільових показників від необхідних [14-16]. Фіксування цього сенсу, що доповнене вимогою мінімальних ресурсних витрат за допустимий час, визначає закон ситуаційного управління процесами РЕЗ і координації дій.

Цілепокладання є основною ключовою функцією управління, яка не тільки в основному визначає зміст та ефективність управління, а й поєднує та визначає зміст усіх інших функцій управління [14-16].

Мета - це образ бажаного стану стійкості режиму зондування РЛС у конфліктних умовах та є основою для підготовки, прийняття та реалізації керуючих рішень.

Процес управління - це ієрархічний процес виконання функцій управління, в результаті яких керований об'єкт приводиться в бажаний стан. Якістю цілепокладання, своєю чергою, зумовлено те,

наскільки у поставлених цілях (оперативних, тактичних, стратегічних) точно і повно відображена проблема, що відокремлює поточну КС від бажаної. Цілепокладання задається системою цілей, критеріїв та їх показників ефективності для ієрархічних рівнів управління. Цілепокладання має бути адекватно загрозам конфліктних ситуацій, пропорційно до небезпек їх складових, а також відповідати необхідним цільовим показникам.

Цілепокладання залежить від багатьох факторів, визначальними з яких є [3-7, 13]: складність двосторонньої динамічної моделі аналізованої конфліктної взаємодії, специфіка побудови та функціонування структури САУ<sub>ст</sub> та участь суб'єкта управління - суб'єктність управління.

Вплив складності цілепокладання характеризується

- об'єктами та факторами зовнішнього та внутрішнього управління: структурою, стратегією та тактиками комплексу РЕП; КС; сукупністю інформаційних режимів зондування РЛС та засобів їх РЕЗ; дослідженнями їх результативності та стійкості, а також структурою та динамікою функціонування самої САУ<sub>ст</sub> [1-8,13];

- невизначеністю інформації про можливий розвиток подій при досягненні поставленої мети, яка характеризується розширенням спектра можливих конфліктних ситуацій, коли стає все важчим заздалегідь передбачити та закласти дані у процеси цілепокладання, адекватністю результатів процесів аналізу стану та динаміки поточної КС;

- різноманіттю та мінливістю (стрибокподібною динамічністю) способів постановки, видів маскуючих та імітуючих активних завад з широкими діапазонами зміни їх параметрів, які в комбінації можуть викликати різного роду вразливість стійкості режимів зондування;

- тенденцією переходу від різноманіття видів та параметрів активних завад силового характеру впливу до низько потужних «сигналоподібних» завад з імітуючими ефектами впливу на системи обробки інформації в РЛС, що ускладнює їх виділення та подальшу нейтралізацію їх впливів;

- наявністю прихованого обманного інформаційного впливу противника, провокаційного або імітаційного характеру з метою дезінформації та спрямованого на спотворення алгоритмів управління інформаційною стійкістю режимів зондування; руйнуванням структурних зв'язків їх системи управління, а також з метою психофізичного тиску на суб'єкт управління;

- комбінуванням «сигналоподібних» завад і інформаційних впливів, що заважають;

- розширенням різноманітності способів та засобів РЕЗ як адекватної реакції на різноманіття способів постановки активних завад [2, 8], інформаційних впливів та їх видів з широким діапазоном зміни їх параметрів, якістю та кількістю комбінацій при їх комплексуванні у ході протидії стратегії РЕП та нейтралізації цих впливів;

- труднощами формалізації процесів цілепокладання та оцінки показників їх ефективності для різних

динамічних станів КС, що потребує застосування додаткових до логіко-оптимального методів для синтезу шуканого закону управління процесами РЕЗ [10-12].

Інформаційне протистояння [3,4,13] для прихованого проникнення в автоматизований процес прийняття противником рішення на проведення РЕП за допомогою обману та рефлексивної форми управління виконується шляхом: а) техніко-інформаційних впливів на СРТР-САУ<sub>РЕП</sub>, САУ<sub>РЕП</sub>-СРЕП та систему наведення у СРЕП для утруднення чи зриву процесів управління комплексом РЕП; б) психофізичного тиску на свідомість та фізичний стан суб'єктів управління комплексу РЕП. Використання способів інформаційного протистояння таїть у собі можливості отримання конфліктної переваги, незважаючи на значні інтелектуальні зусилля для: маскування своїх дій (випромінювання зондувального сигналу та застосування засобів РЕЗ); примусу противника до необхідних РЛС дій веденням його в оману дезінформацією, імітацією, маніпуляцією інформації та ін. Ефективність інформаційного протистояння залежить від здібностей інтелекту системи управління повно враховувати цілі та поведінку противника. Сторона, яка має вищий ранг рефлексії, отримує конфліктну перевагу внаслідок інформаційного протистояння.

Для побудови процесів цілепокладання та забезпечення ефективності його рішень використовується сукупність системно-процесного, цільового, ситуаційного та інтерпретаційно-експериментального (евристичного) підходів до управління [14-16]. Отриманий при цьому результат формалізації процесів цілепокладання дозволяє бачити повний список завдань, здійснювати контроль вирішення кожного завдання з початку і до кінця, можливість бачити місце труднощів і зриву процесів цілепокладання. Таке уявлення допомагає сфокусуватися на цільовій та значущій інформації для розв'язання задач оптимізації процесів цілепокладання. Формалізація сприяє розробці рішень, адаптації інтерфейсів суб'єктів керування у схемах керування структурними елементами САУ<sub>ст</sub> або її базовими об'єднаннями функціональних елементів.

Тому подолання складності процесів цілепокладання можливе при використанні адекватної структури САУ<sub>ст</sub>, забезпеченні в ній системності процесів, підвищення рівнів формалізації та інтелектуалізаційних процесів. Це дозволить суттєво знизити ступінь впливу суб'єктивності на вироблені в САУ<sub>ст</sub> рішення з цілепокладання і домогтися їх обґрунтованості, повноти, несуперечності та узгодженості.

Нижче наводиться розгляд впливу зазначених факторів на процеси цілепокладання.

**Особенности построения и функционирования САУ<sub>уст</sub>, влияющие на структуризацию, интеллектуализацию процессов целеполагания, повышение обоснованности и оперативности решений в условиях дефицита времени на принятие решения.** Особливості побудови та функціонування САУ<sub>ст</sub>, що впливають на структуризацію, інтелектуалізацію процесів цілепокладання, підвищення

обґрунтованості та оперативності рішень в умовах дефіциту часу на прийняття рішення

Підвищення конфліктної стійкості режимів зондування РЛС багато в чому визначаються можливостями САУ<sub>ст</sub>, обґрунтована структура якої представлена внаслідок багатофакторного аналізу в роботах [5-7]. Взаємодія структурних елементів САУ<sub>ст</sub>, що послідовно реалізує безперервні цикли управління цілепокладанням, виконується на 3-х ієрархічних рівнях управління контурів внутрішнього та зовнішнього управління з розподіленнями на них функціями управління. Так, цілепокладання направляє їх виконання на рівнях:

- верхньому (стратегічному), де здійснюється аналіз результатів оцінки динамічного стану КС та ймовірнісних прогнозів його розвитку, з виявленням проблеми; постановкою та узгодженням цілей на ієрархічних рівнях управління САУ<sub>ст</sub>, побудова багатоцільової стратегії управління РЕЗ на відносно віддалену перспективу;

- середньому (тактичному), де визначаються способи ситуаційного управління для: досягнення поставлених цілей та перебудови функціональної структури САУ<sub>ст</sub> на ближню ситуаційну перспективу відповідно до обраного напрямку РЕЗ; обґрунтування перебудови як етапів процесів синтезу шуканого закону ситуаційного управління процесами РЕЗ, що здійснюють практичний розподіл ресурсів РЕЗ залежно від поставленої мети, ступеня невизначеності динамічного стану КС та формалізації завдань управління, так і тактичної структури засобів РЕМ, РЕЗ та інформаційного протистояння;

- нижньому (оперативному), де виконується: технологічна перебудова структури САУ<sub>ст</sub> із регулюванням режимів та параметрів задіяних засобів протидії стратегії РЕП на поточний період часу; контроль на відповідність фактичного результату досягнення обраної стратегічної мети очікуваному з подальшим ініціюванням усунення відхилення та коригуванням структури САУ<sub>ст</sub> у сенсі надання їй додаткових ресурсів РЕЗ та часу для досягнення стратегічної мети чи її зміни.

Динаміка перебудови ієрархічної структури САУ<sub>ст</sub> визначається цілепокладанням, що виробляється суб'єктом управління та контуром інтелектуального управління у різних КС з урахуванням ресурсних можливостей та обмежень. Динаміка функціонування САУ<sub>ст</sub> реалізується за допомогою об'єднання структурно-функціональної та сеті-центричної схем системно-процесного, когнітивного та рефлексивного управління. Синтез стратегій та закону ситуаційного управління процесами РЕЗ будується на балансі одночасного застосування цих схем управління з урахуванням поточних умов спостереження, ухвалення рішень та результатів контролю їх виконання.

Об'єднання структурно-функціональної та сеті-центричної схем управління функціонуванням САУ<sub>ст</sub> робить можливим процес синтезу етапів цілепокладання, з набору більш простих процесів, що виконуються структурними елементами САУ<sub>ст</sub> на ієрархічних рівнях управління з урахуванням циклів управл-

іння для дальньої, ближньої перспектив та поточного періоду часу, а також швидкості змін КС.

Структурно-функціональна схема побудована з урахуванням аксіом та етапів раціонального ієрархічного управління [14-16]. Ця схема багатоканальна. Число каналів схеми визначається числом вирішуваних окремих завдань верхнього рівня управління. Кожен канал схеми реалізує етап інформаційного забезпечення процесів управління (Підсистему процесів інформаційного забезпечення управління РЕЗ) та етапи підготовки, прийняття та реалізації рішення на ієрархічних рівнях управління (Підсистему процесів підготовки, прийняття та реалізації конфліктно-стійких рішень без суб'єкта управління, але під його контролем). Їх робота базується на застосуванні логіко-оптимальних методів аналізу та синтезу в умовах визначеності та ризиків КС. Ця схема управління реагує на порівняно повільні зміни стану КС.

Багатоконтурна сеті-центрична схема забезпечує пріоритетну участь суб'єкта управління у процесах цілепокладання та складає з урахуванням прямих та зворотних зв'язків у структурі САУ<sub>ст</sub> основу контуру інтелектуального управління САУ<sub>ст</sub> в умовах складних та непередбачуваних КС з високим рівнем невизначеності різного роду. Субконтур управління в контурах зовнішнього та внутрішнього управління виконують управління функціональними модулями у структурно-функціональній схемі на рівнях та етапах управління. Структури цих субконтурів управління включають до свого складу спеціалізовані інформаційні, керуючі та виконавчі засоби, що реалізуються структурними елементами САУ<sub>ст</sub>. Схема функціонує в реальному часі і орієнтована на швидкі зміни стану КС. Вона відрізняється підвищеною чутливістю до змін стану КС, швидкістю реакції на ці зміни в умовах невизначеності різного роду та доповнює структурно-функціональну схему можливістю оперативного втручання суб'єкта управління на її етапах.

Інтелектуальна платформа ієрархічної структури сеті-центричної схеми управління складається з використання когнітивних та креативно-рефлексивних здібностей суб'єкта управління, його професійних компетенцій та можливостей спеціалізованої інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (ІСПВР). Інтелектуальне управління – це технологія управління знаннями, яка відіграє основну роль при прийнятті рішень. Воно дає можливість, поряд із рішенням або під час отримання рішення, здійснювати пошук нових знань та накопичення інтелектуальних ресурсів [18].

Суб'єкт управління бере участь у оделях вирішення завдань на рівнях та етапах управління у структурно-функціональній схемі синтезу стратегій та закону ситуаційного управління процесами РЕЗ, реалізації низки інших функцій управління на ієрархічних рівнях управління. Він веде спостереження за ходом процесів цілепокладання, використовуючи прями та зворотні зв'язки у структурі САУ<sub>ст</sub> для навчання та накопичення знань на всіх рівнях ієрархії управління в єдиному з ІСПВР полі управління, здійснює координацію дій для отримання синергії цілепокладання.



ІСППР на основі експертних систем інтегрована в об'єднання структурно-функціональної та сеті-центричної схем управління. Це створює єдине середовище інтелектуального управління із застосуванням формального та неформального знання про конкретні способи та засоби РЕП і РЕЗ, умови їх застосування та властивості управління їх застосуваннями, зосередженого в цих схемах та ІСППР. ІСППР також накопичує результати аналізу інформації про стратегії РЕП і РЕЗ, що застосовуються. Цим самим система посилює креативно-рефлексивні здібності суб'єкта управління та підвищує рівень його професійних компетенцій, розширює можливості пошуку ефективних рішень на етапах процесів аналізу, ймовірнісного прогнозу та синтезу цілей РЕЗ на часових інтервалах, що відповідають рівням управління у САУ<sub>ст</sub> [17, 18].

Застосування ІСППР здійснюється залежно від ступеня невизначеності КС та їх зміни, а також ступеня формалізації процесів синтезу на основі використання знань про сильні та слабкі сторони антагоністичних стратегій сторін конфлікту. Це особливо важливо при: високій динаміці зміни КС та значень її параметрів; періодичній відсутності прагматичної своєчасної інформації, необхідної для прийняття рішень; прагненні противника сформулювати свідомо хибні уявлення про справжні значення параметрів КС; жорстких тимчасових обмеженнях, що накладаються на прийняття рішень.

ІСППР підтримує прийняття рішення логіко-лінгвістичним, експертним або евристичними методами в об'єднанні представлених схем управління цілепокладанням.

Необхідний облік впливу факторів суб'єктивності управління цілепокладанням на ефективність процесів кризового управління в умовах підвищеної напруженості у позаштатних режимах та в умовах дефіциту часу. Тому критерії, їх показники оцінки ступеня відповідності професійних компетенцій суб'єкта управління необхідної моделі поведінки, що забезпечує успішне досягнення стратегічних та тактичних цілей РЕЗ, повинні входити до складу показників ефективності управління САУ<sub>ст</sub>. Для оцінки інтелектуального рівня застосовується компетентнісний підхід та вимір професійних компетенцій [19-24].

Зауважимо, що при цілепокладанні також можливі автоматичні рішення у разі впливу активних завад у простих і певних КС.

**Особливості етапів цілепокладання.** Основними інструментами часткової формалізації процесів цілепокладання, залишаючи поле діяльності для суб'єкта управління, є:

- постановка задачі синтезу стратегій раціонального багатоцільового управління та ситуаційного закону управління процесами РЕЗ динамічної інформаційної стійкості режимів зондування РЛС у проблемних областях зони огляду РЛС;

- виділення контурів зовнішнього та внутрішнього управління, що відрізняються цілями управління;

- цілі, критерії та їх показники ефективності ціледосягнення для надання бажаних властивостей структурі САУ<sub>уст</sub> та динаміці її функціонування;

- створення умов забезпечення цільового результату з урахуванням пріоритетності дій в умовах обмежень ресурсу РЕЗ;

- порядок вирішення завдань на ієрархічних рівнях у Підсистемах процесів інформаційного забезпечення та інтелектуального управління цілепокладанням;

- базова модель багатоцільової стратегії прогнозування управління процесами РЕЗ;

- використання зворотного зв'язку для надання безперервності процесам цілепокладання за результатами контролю та аналізу невідповідності результату поставленої мети, а також урахування результатів аналізу накопиченої інформації про стратегії РЕП і РЕЗ, що застосовуються. Зворотній зв'язок дає змогу виявити ознаки прихованого зовнішнього управління противником функціонування об'єкта управління та САУ<sub>ст</sub>.

**Етап інформаційного забезпечення.** Цілепокладання має враховувати відстежувані на цьому етапі в ході конфлікту конкретні можливості стратегії РЕП щодо; змін параметрів околиць точок бі-поліфуркації процесу РЕП, небезпечних постановок активних завад, їх видів і параметрів, а також характеристик інформаційних впливів, що заважають; класифікації КС; ймовірнісних прогнозів динамік розвитку КС для часових циклів рівнів управління та оцінок небезпек загроз.

Підсистема процесів інформаційного забезпечення САУ<sub>ст</sub> частково формалізує ці процеси в реальному часі. Вона визначає та розподіляє за рівнями управління умови спостереження та прийняття рішень: стан визначеності КС; наявність ризиків управління, коли відомі ймовірності подій та розміри втрат складу та якості РЛЛ; стан невизначеності КС.

Інформація, що добувається про загрози та впливи завад, використовується для оптимізації процесів вирішення інформаційних завдань режимів зондування в умовах впливу різних видів завад та їх параметрів з одного боку, а з іншого – для зниження можливостей комплексу РЕП з розвідки режимів зондування РЛС та їх придушення. Аналіз здійснюється на основі знання двосторонньої динамічної моделі конфліктної взаємодії складових частин комплексу РЕП та оглядової РЛС [6, 7], а також попередньо проведеної класифікації КС з використанням прийомів SOFT-аналізу [22], когнітивних карток [23] для структурування інформаційних даних.

Повнота (насиченість знаннями, результатами критичного їх аналізу та зіставлення), достовірність та своєчасність розподілу отриманої інформації між усіма рівнями та їх етапами управління, засобами РЕЗ для трансформації результатів інформаційного забезпечення у процеси цілепокладання та узгодження зв'язків між ними є необхідною умовою для ефективного цілепокладання. Узагальненим показником ефективності інформаційного забезпечення може бути її ймовірність через ймовірність виконання перерахованих функціональних завдань за час, що не перевищує допустиме значення.

**Цілепокладання на верхньому рівні управління.** Підсистема процесів інтелектуального управління етапами цілепокладання на цьому рівні частково

формалізує постановку ієрархічно пов'язаних цілей з урахуванням їх здійсненності і ряду стратегічних завдань цілепокладання в деякій проблемній області зони огляду РЛС з конкретним режимом зондування і динамічним станом КС.

Формалізація процесів цілепокладання здійснюється з пріоритетом цілей та їх досягненням над інформаційним описом конфліктних ситуацій.

**Постановка задач синтезу стратегій раціонального управління процесами РЕЗ динамічної інформаційної стійкості режимів зондування РЛС.** Відправною точкою побудови стратегії є формулювання проблеми, яка знижує невизначеність, отримуючи уявлення про те, чого можна досягти управлінням. Для цього здійснюється обґрунтований вибір: мети, що відображає певний результат, якого бажає досягти САУ<sub>ст</sub>; методів та засобів досягнення цілей; найбільш ефективного порядку їх застосування під час досягнення головної стратегічної мети.

Стратегії, як послідовності розв'язуваних окремих стратегічних завдань (1) з урахуванням логіки взаємозв'язку між ними, синтезуються в циклі стратегічного управління таким чином, щоб кожен черговий  $n$ -й вектор  $U$  при зміні КС найкраще відповідав досягненню головної мети управління процесами РЕЗ з урахуванням індивідуальних особливостей поточного режиму зондування та КС (проблемної області зони огляду). Рішення при цьому стратегічних завдань повинні мати взаємно посилюючий характер, а загальна кількість векторів  $U$  залежить від динаміки стратегії РЕП та ступеня невизначеності опису динамічного стану КС.

$$\left\{ |S^U - S^{\Phi}| = F[Z, R, I, L(u), K, KC(n)] \right\}_{KC(n)} \rightarrow \begin{cases} \rightarrow \text{const} \\ \forall KC(n), n = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (1)$$

$$\left\{ |S^U - S^{\Phi}| = F[Z, R, I, L(u), K] \rightarrow \min, \right. \\ \left. R \rightarrow \min, T \leq T_{\text{ДОП}} \right. \quad (2)$$

Вираз (2) відображає умову знаходження закону управління процесами РЕЗ у динаміці зміни деякої КС (у ситуаційному циклі управління):

У виразах (1), (2) використовуються вектори параметрів моделі об'єкта керування:  $S^U$  - вектор опису бажаного стану інформаційної стійкості режиму зондування (або КС у разі активної зміни ситуації);  $S^{\Phi}$  - вектор опису фактично досягнутого на даний момент часу стану при виборі поточного керуючого елемента (КЕ) із зазначенням кількісних характеристик ступеня досягнення мети РЕЗ на основі контролю результату управління та умов спостереження та прийняття рішення;  $I$  - вектор індивідуальних характеристик режиму зондування (або КС);  $R$  - вектор, який характеризує види витрат ресурсів, що є в розпорядженні САУ<sub>ст</sub> на даний момент часу;  $F$  - структура закону управління процесами РЕЗ, що пов'язує вихід режиму зондування з впливами, що заважають, і засобами підтримки стійкості,  $L(u)$  - оператор  $U \rightarrow S^{\Phi}$ , що відображає елементи САУ<sub>ст</sub> на сукупність показників фактичного стану режиму зондування або КС,  $U$  - послідовність з КЕ, що призводить до поставленої мети РЕЗ;  $Z$  - база знань;  $K$  - вектор обліку переваг суб'єкта

управління, як оцінка корисності або якості альтернативи, що розглядається. Він може бути заданий інтегрально без виділення ознак, якими він виробляється, а також за різними ознаками.

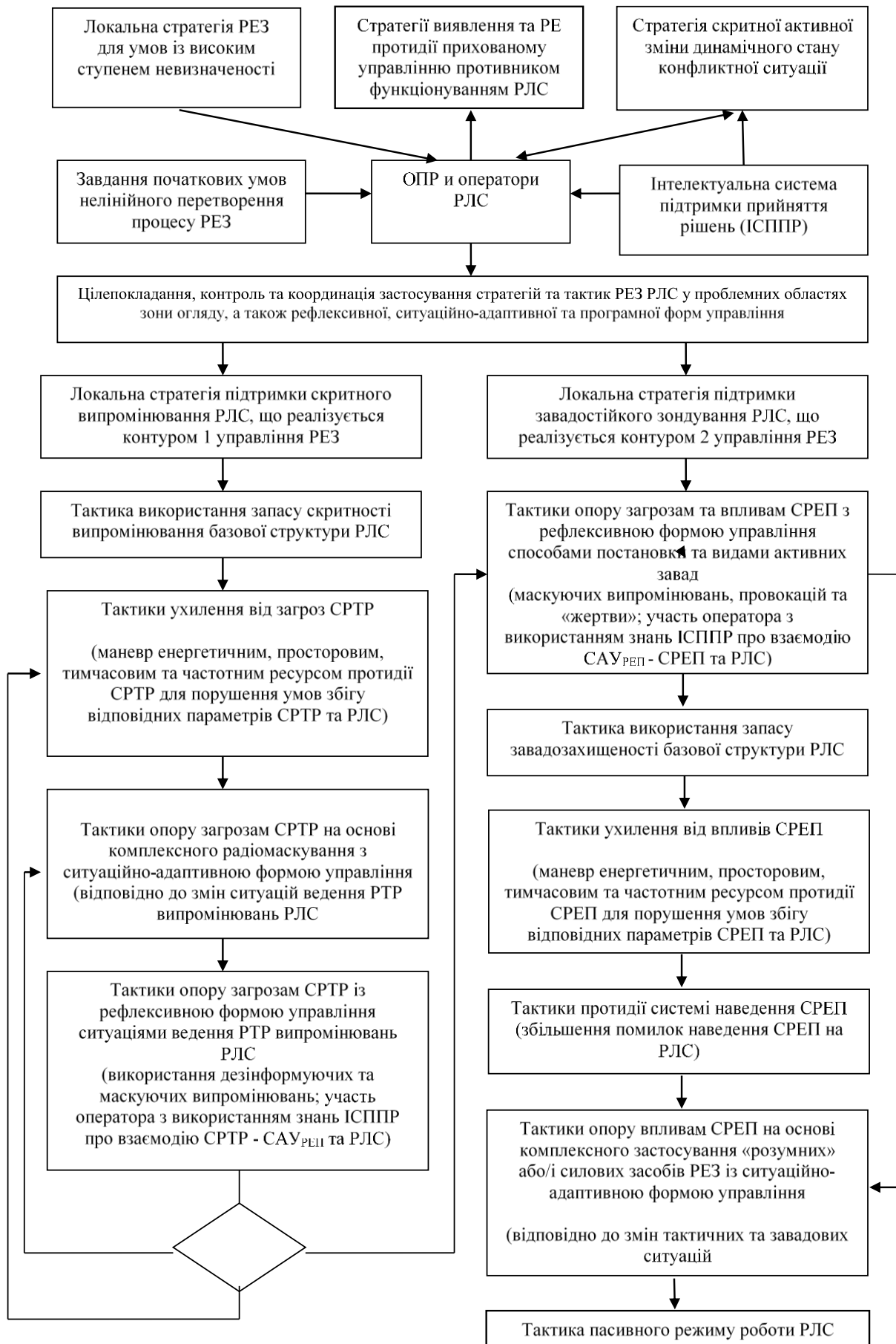
Закон управління процесами РЕЗ в динаміці деякої КС полягає у тому, щоб сформувати таку послідовність з КЕ, яка найефективніше призводить до поставленої мети РЕЗ. При формуванні кожного управляючого впливу оцінюється різниця  $|S^U - S^{\Phi}|$ , мінімальне значення якої відповідає оптимальному для даної ситуації управляючому впливу.

**Базова багатопільова стратегія прогнозуючого управління процесами РЕЗ.** Ця стратегія, що містить цілі загальних стратегічних напрямів РЕЗ РЕП у рамках 2-хсторонньої динамічної моделі аналізованої конфліктної взаємодії [5-7] та логіки їх застосування. Вона фіксує стратегічне бачення та визначає систему координат, в яких здійснюється протидія стратегії РЕПі. Її логіки процесів прийняття управлінських рішень враховують невизначеність виникнення КС, особливості функціонування оглядової РЛС у поступовій динаміці конфлікту та передбачають гнучкий порядок зміни цілей за допомогою фактичних результатів процесів цілепокладання та прогнозів конфліктної взаємодії. Базова стратегія використовується як джерело апріорної інформації щодо системи цілей та формалізації їх постановки в динаміці конфлікту, наявного ресурсу РЕЗ у структурі САУ<sub>ст</sub>, необхідного для реалізації кожної обраної мети, а також початкового його розподілу. Вона є керівництвом для встановлення цілей, забезпечує основу для їх узгодження у прогнозованих умовах конфліктної взаємодії.

Основними принципами її побудови є: подвійне розуміння КС - правильного у себе і хибного у противника; діяти при сприятливому для досягнення поставленої мети збігу обставин; застосовувати можливі тактики управління станом та динамікою КС із використанням «несилових» та «силових» технічних рішень за найменших витрат ресурсів. Повинна також виконуватися необхідна умова - мінімізація часу, відведеного прийняття стратегічного рішення.

Методичною основою цільового підходу є визначення головної мети та її диференціації за ієрархічними рівнями управління та процесами управління цілепокладанням на них (а також за елементами структури САУ<sub>ст</sub>) для завдання оптимальної послідовності дій при досягненні поставленої мети. Головну мету РЕЗ можна формулювати наступним чином: забезпечити задані ймовірності стійкого функціонування режимів зондування РЛС та САУ<sub>ст</sub> шляхом створення умов для безперервного та нормального функціонування режимів зондування оглядової РЛС у конфліктній взаємодії з комплексом РЕП, а також реалізація ефективних процесів цілепокладання. Іншими словами, мета функціонування САУ<sub>ст</sub> полягає в тому, щоб показники стійкості режимів зондування знаходилися в межах заданої цільової області  $|S^U - S^{\Phi}|$  або мінімізували відстані до цільової точки заданої області (1), (2).

На рис. 1 представлений ймовірнісний варіант базової стратегії прогнозуючого управління процесами РЕЗ в кожній проблемній області.



**Рис. 1.** Варіант базової багаточільової стратегії прогнозуючого управління процесами РЕЗ оглядової РЛС в умовах навмисних активних завдань і інформаційних впливів, що заважають, у проблемних областях її зони огляду

Він передбачає для досягнення головної мети управління кілька напрямлень та логік процесів прийняття управлінських рішень залежно від результату прогноза умов спостереження та прийняття рішень.

До них відносяться:

1) комбінювання цілей окремих стратегій внутрішнього та зовнішнього управління в наступній послідовності для:

- створення передумов та умов стійкості безперервного та нормального функціонування поточного режиму зондування РЛС шляхом створення запасу завалодозахищеності в його алгоритмі застосування моделі зондувального сигналу з підвищеною скритністю випромінювання і стійкістю до завад узгодженої обробки сигналів, що приймаються;

- створення умов для запобігання втрати скритності випромінювання шляхом застосування стратегії рефлексивної підтримки енергетичної та структурної скритності випромінювання РЛС із застосуванням засобів РЕМ;

- створення умов для запобігання впливу небезпечних активних завад після втрати скритності випромінювання шляхом застосування стратегії рефлексивної підтримки завадостійкого зондування активним інформаційним впливом на динамічний стан КС та використанням засобів РЕЗ;

- надання опору впливам активних завад шляхом застосування реактивної стратегії внутрішнього ситуативного управління, використовуючи засоби РЕЗ для їх компенсації чи придушення;

- виявлення прихованого управління противником інформаційної стійкістю режимів зондування РЛС і САУ<sub>ст</sub> за результатами оцінок психологічного тиску на суб'єкта управління, порушень алгоритмів прийняття керуючих рішень та неузгодженості фактично досягнутих цілей з очікуваними, а також надання їм опору;

2) використання стратегії підтримки завадостійкого зондування РЛС в умовах впливу активних завад шляхом застосування тактик:

- з рефлексивною формою управління способами постановки та видами активних завад у системах САУ<sub>РЕП</sub> – СРЕП;

- використання запасу завадостійкості базової структури РЛС;

- протидії системі наведення СРЕП;

- надання опорув впливам СРЕП; використання пасивного режиму роботи РЛС;

3) використання стратегії потайної зміни динамічного стану КС шляхом техніко-інформаційного та психофізичного впливу на системі СРТР – САУ<sub>РЕП</sub>, САУ<sub>РЕП</sub> – СРЕП комплексу РЕП;

4) використання стратегії РЕЗ для умов високого ступеню невизначеності КС на основі застосування логіко-лінгвістичного та/або експертного чи евристичного методів управління цілепокладанням за непрямими ознаками порушення стійкості; одержаних за допомогою інтелектуальних методів та засобів управління.

При постановці цілей також визначається те, чого не можна робити за будь-яких обставин.

**Цілепокладання на середньому рівні управління.** Підсистема процесів інтелектуального управління етапами цілепокладання на цьому рівні частково формалізує:

- визначення, обґрунтування способів досягнення поставлених стратегічних цілей;

- отримання керуючих рішень для перебудови структури САУ<sub>уст</sub>, пов'язаної з раціональним розподілом ресурсів РЕМ, РЕЗ та/або засобів інформаційного протиборства, необхідних досягнення поставлених цілей.

Керуючими параметрами при цьому є тактики та його ресурси.

Основні тактичні прийоми управлінських рішень полягають у:

- запобігання ризику завдяки результатам прогнозу динамічного стану КС;

- уникнення ризику - ухилення від впливів, пов'язаних з ризиком;

- зниження ступеня ризику - зменшення ймовірності втрат і скорочення очікуваного їх обсягу;

- утримання допустимого рівня ризику в умовах невизначеності різного роду шляхом її подолання та опору деструктивним впливам за допомогою вбудованих та додаткових засобів РЕМ, РЕЗ та кіберзахисту, орієнтуючись на інноваційні засоби та їх комплексування для концентрації зусиль для виконання РЕЗ вимог до динамічної стійкості режимів зондування РЛС;

- пошуку суб'єктом управління можливих рішень за умовами невизначеності високого рівня, використовуючи накопичені знання, досвід та свої креативно-рефлексивні здібності.

При цьому береться до уваги відмінності способів ціледосягнення для внутрішнього та зовнішнього управління, а також:

- особливості застосування: логіко-оптимального для умов визначеності у разі простих КС та ризиків; логіко-лінгвістичного та/або експертного та евристичного методів пошуку рішення для умов невизначеності у разі складних та непередбачених КС, а також складно формалізованих завдань цілепокладання [10-12];

- інтегрування методів вирішення управлінських завдань цього рівня управління залежно від умов спостереження.

Розподіл обмежених ресурсів здійснюється за схемою "мета - дії - необхідний ресурс" з виконанням вимоги мінімізації ресурсних витрат. Вирішення ресурсних завдань пов'язане з двома основними аспектами вибором тактик, їхнього ресурсу для внутрішнього або зовнішнього управління з урахуванням стану, динаміки КС та розподілом ресурсів РЕЗ.

Проблема рішення пов'язана з тим, що на практиці для досягнення поставлених цілей потрібні різні ресурси, кількість яких обмежена. Не можна допустити невідповідності між цілями САУ<sub>ст</sub> та її ресурсами, необхідні для їх досягнення.

Інакше виникає потреба пошуку ресурсного компромісу. Досягти зниження обсягу необхідних

ресурсів можливо відбором найбільш ефективних окремих стратегічних завдань РЕЗ, їх тактик і комплексування найбільш ефективних ресурсів з урахуванням можливого застосування тих самих тактик.

Специфіка процесів цього рівня також залежить від процесів раціонального вибору на ближню перспективу тактик та розподілу їх ресурсів від виду обраної мети на верхньому рівні, стану та динаміки поточної КС.

**Цілепокладання на нижньому рівні управління.** Особенности цілепокладання на этом уровне связаны с обеспечением кратко временной информационной стабильности режимов зондирования РЛС: перестройкой структуры САУ<sub>уст</sub>, на текущий период времени, реализующей выбранных тактик с регулирование режимов и параметров назначенных средств РЭМ и РЭЗ, средств информационного противодействия; контролем и анализом результатов управляющих воздействий, а также инициализации устранения отклонений от выбранной цели путем корректировки методов выбора и распределения ресурсов, затрат ресурсов и времени принятия решения или стратегической цели.

Особую роль на этом этапе играет контроль фактического состояния устойчивости объекта управления в результате выполнения внешних и внутренних управляющих воздействий в перестроенной САУ<sub>уст</sub>.

Следует отметить специфику процессов перестройки структуры РЭЗ в САУ<sub>уст</sub> и контроля результатов целеполагания от вида выбранной на верхнем уровне цели.

Особенности целепокладання на цьому рівні пов'язані із забезпеченням короткочасної інформаційної стабільності режимів зондування РЛС:

перебудовою структури САУ<sub>ст</sub>, на поточний період часу, що реалізує обрані тактики з регулювання режимів та параметрів призначених засобів РЕМ, РЕЗ та інформаційної протидії;

контролем та аналізом результатів керуючих впливів, а також ініціалізації усунення їх відхилень від обраної мети шляхом коригування методів вибору та розподілу ресурсів, витрат ресурсів та часу прийняття рішення чи зміни стратегічної мети.

Особливу роль цьому етапі грає контроль фактичного стану стійкості об'єкта управління в результаті виконання зовнішніх і внутрішніх управляючих впливів у перебудованій САУ<sub>ст</sub>. Слід зазначити специфіку процесів перебудови структури РЕЗ в САУ<sub>ст</sub> та контролю результатів визначення мети від виду обраної на верхньому рівні мети.

За результатами послідовних оперативних порівнянь неузгодженостей фактичних станів об'єкта управління з цільовими  $|S^{II} - S^{\Phi}|$ , ресурсних витрат, результатів аналізу накопичених даних про застосовувану стратегію РЕП та прогнозів змін КС здійснюються зміни стратегічних цілей і будуються траєкторії внутрішнього та зовнішнього управління станом та динамікою КС для досягнення головної мети РЕЗ.

Важливою особливістю оцінки відповідності фактичних показників ефективності управління очікуваним при цілепокладанні є застосування широко поширених на практиці характерних індикаторів ефективності роботи засобів РЕМ і РЕЗ [2,8,16]. Індикаторні показники дозволяють виміряти внесок цих засобів (у зв'язку з показниками ефективності управління цілепокладанням на ієрархічних рівнях) у досягнення цілей стратегії управління РЕЗ.

## Висновки

Для підвищення та забезпечення інформаційної стійкості режимів зондування оглядової РЛС в умовах її придушення керованими активними завадами та інформаційними впливами, що заважають, системно проаналізовані особливості способів і засобів управління процесами цілепокладання в структурі спеціалізованої системи автоматизованого управління і на етапах її функціонування. Вони різноманітні і пов'язані з підвищенням рівнів формалізації та інтелектуалізації її контурів внутрішнього та зовнішнього управліннь динамічним станом конфліктних ситуацій.

Це, у свою чергу, дозволить отримати більшу обґрунтованість і оперативність прийнятих керуючих рішень при дефіциті часу на їх прийняття, зменшення помилок цілепокладання для різних конфліктних ситуацій. У цьому враховується відповідність цілей управління інформаційною стійкістю поточного режиму зондування конкретним конфліктним ситуаціям, які виникають у проблемних областях зони огляду РЛС. Представлені способи та засоби сприятимуть доданню синтезованим під час конфлікту багатоцільовим стратегіям і ситуаційному закону управління процесами РЕЗ і координації дій бажаних властивостей.

Важливим інструментом часткової формалізації управління цілепокладання є запропонований варіант базової багатоцільової стратегії прогнозуючого управління процесами РЕЗ, беручи до уваги відмінності цілей і процесів управління цілепокладанням для внутрішнього і зовнішнього управліннь. Базова стратегія містить загальні напрями РЕЗ з різними логіками процесів прийняття керівних рішень і досягнення поставленої мети РЕЗ залежно від властивостей динамічних станів конфліктних ситуацій. Вона є також джерелом апріорної інформації обґрунтування вибору цілей, тактик та їх ресурсів.

Для повного визначення критеріїв якості управління цілепокладанням потрібно завдання ієрархічно пов'язаної системи відповідних показників ефективності та методики їхнього розрахунку. Отримані результати при цьому входять до основних положень такої методики з урахуванням визначення зон допустимих витрат динамічної стійкості об'єкта управління, а також попереджуючих виникнення критичних і катастрофічних неузгодженостей фактичних значень показників ефективності управління з потрібними.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Конфликтно-устойчивые радиоэлектронные системы. Методы анализа и синтеза. / Ю.А. Астапенко, С.Н. Вайпан, В.С. Верба [и др.]. М.: – Издательство «Радиотехника», 2015 – 312 с.
2. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
3. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сете-центрических войнах начала XXI века. Монография. / С.И. Макаренко –СПб.: Научное издание, 2017. – 546 с.
4. Козирацкий Ю. Л. Модели информационного конфликта средств поиска обнаружения: моногр. – М.: Радиотехника, 2013. – 232 с.
5. Канцедал В.М. Структура автоматизованої системи управління інформаційною стійкістю наземної оглядової РЛС в умовах активних завад / В.М. Канцедал, А.А. Могила // XVI міжнародна наукова конференція Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба "Новітні технології – для захисту повітряного простору": тези доповідей, 15 – 16 квітня 2020 року. –Х.: ХНУПС імені Івана Кожедуба, 2020. – С. 334, URL: <http://www.hups.mil.gov.ua/assets/doc/science/conference/16/xvi-conf-hnups.pdf>
6. Канцедал В.М. Структура автоматизованої системи управління інформаційною стійкістю наземної оглядової РЛС в умовах активних завад / В.М. Канцедал, А.А. Могила // Системи озброєння і військова техніка, № 1 (61), 2020, – С. 82 – 95. –Х.: ХНУПС ім. І. Кожедуба, URL: <https://journal-hnups.com.ua/index.php/soivt/article/view/245>
7. Kantsedal V., Mogyla A. A Multifactorial Approach to Building a System for Automated Control of Radar Information Stability / V.Kantsedal, A. Mogyla // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (MRRS) Kharkov, Ukraine, September 21 – 25, Volume 2, pages 373-378. URL: [https://drive.google.com/file/d/1rnRSc1SV\\_I6hJ--uhjkQPhxZ6FDzLY8/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1rnRSc1SV_I6hJ--uhjkQPhxZ6FDzLY8/view?usp=sharing) (Пароль для распаковки zip-файла сборника трудов совпадает с именем файла –«UkrMW-2020».)
8. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск: учебник / В.Н. Тяпкин, А.Н. Фомин, Е.Н. [и др.]; под общ. ред. В.Н. Тяпкина. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т. – 2011. – 536 с.
9. Гончаренко В.А. Концептуальные основы построения устойчивых к воздействиям автоматизированных систем специального назначения на основе адаптивных технологий / В.А. Гончаренко // Научные исследования в космических исследованиях Земли. – 2018, Т10, № 4. – С. 38– 74.
10. Лукьянова Л. М. Целеполагание, анализ и синтез целей в сложных системах, модели и методы моделирования / Л.М. Лукьянова // Известия РАИ. Теория и системы управления, 2007, № 5, с. 100-113. Источник: <http://naukarus.com/tsepolaganie-analiz-i-sintez-tseley-v-slozhnyh-sistemah-modeli-i-metody-modelirovaniya>
11. Лукьянова Л. М.. Логико-лингвистическое моделирование целеполагания в сложных системах / Л. М. Лукьянова, Интернет-ресурс: <http://ojs.philosophy.spbu.ru/index.php/lphs/article/view/233/234>
12. Заде Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений / Математика сегодня. М.: Знание, 1974.
13. Дружинин В.В, Конторов Д.С. Введение в теорию конфликта. М.: Радио и связь, 1989. – 288 с.
14. Мишин В. М. Исследование систем управления / В. М. Мишин – М.: ЮНИТИ, 2012. – 527 с.
15. Теория управления (дополнительные главы): Учебное пособие / Подред. Д. А. Новикова. — М.: ЛЕНАНД, 2019. — 552 с.].
16. Круглова Н. Ю. Антикризисное управление. Учебное пособие. 3-е изданиеруглова/ Н. Ю. Круглова. – М.: КноРус, 2013. – 400 с. <https://www.moscowbooks.ru/book/662061/>
17. Интеллектуальное ядро системы поддержки принятия решений / В.П.Осипов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 205. 23 с. doi:10.20948/prepr-2018-205 URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-205>
18. Розенберг И. Н. Интеллектуальное управление// Современные технологии управления. ISSN 2226-9339. — №4 (76). Номер статьи: 7608. Дата публикации: 2017-04-10 . Режим доступа: <https://sovman.ru/article/7608/>
19. Бортник Б.И., Стожко Н.Ю., Судакова Н.П. Оценка компетенций: формализация и формалистика // Современные проблемы науки и образования. – 2017. – № 4.; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=26693> (дата обращения: 14.07.2020).
20. Веремей Е.И. Когнитивная реализация оптимизационного подхода к синтезу законов управления подвижными объектами / Е.И. Веремей // Санкт-Петербургский государственный университет, 2016г. <https://cyberleninka.ru/article/n/kognitivnaya-realizatsiya-optimizatsionnogo-podhoda-k-sintezu-zakonov-upravleniya-podvizhnyimi-obektami>
21. Кравченко В.Н., Филиппин И.В.. Целеполагание в системе управления развитием предприятия; <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/39651/10-Kravchenko.pdf?sequence=1>
22. Коврига С.В. Методические и аналитические основы когнитивного подхода к SWOT-analysis // Проблемы управления. – 2005. – №5. – С. 58–63.
23. К. Авдеева, С. В. Коврига, Подход к постановке задач управления на когнитивной модели ситуации для стратегического мониторинга, УБС, 2016, выпуск 59, 120–146 [ubs856.pdf](https://ubs856.pdf) ].
24. Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Рефлексия и управление: математические модели. М.: Издательство физико-математической литературы, 2013. 412 с.

Received (Надійшла) 06.09.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 03.11.2021

**Канцедал Валерій Михайлович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Інституту радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України, Харків, Україна;

**Valery Kantsedal** – Candidate of Technical Sciences, Senior Research, Senior Research of A.Ya. Usikova Institute of Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [vkantsedal9@gmail.com](mailto:vkantsedal9@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4008-917X>.

**Могіла Анатолій Андрійович** – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділом Інституту радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України, Харків, Україна;

**Anatoly Mogyla** – Candidate of Technical Sciences, Senior Research, Head of Department of A.Ya. Usikova Institute of Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [anatoly\\_mogyla@gmail.com](mailto:anatoly_mogyla@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1726-6265>.

### **Особенности целеполагания при обеспечении информационной устойчивости режимов зондирования обзорной РЛС в процессе их радиоэлектронного подавления**

В. М. Канцедал, А. А. Могіла

**Аннотация.** Рассматриваются особенности управления целеполаганием при обеспечении информационной устойчивости режимов зондирования обзорной РЛС при ее подавлении активными помехами и мешающими информационными воздействиями. Преодоления сложности процессов целеполагания, обоснованности и оперативности принятия решений при дефиците времени на его принятие связаны с обеспечением системности процессов целеполагания, повышением уровней их интеллектуализации и формализации. Это будет способствовать приданию, синтезируемым в ходе конфликта многоцелевым стратегиям и ситуационному закону управления процессами РЭЗ и координации действий желательных свойств. Повышение уровня интеллектуализации процессов целеполагания обеспечивается: декомпозицией общей задачи целеполагания на отдельные более простые подзадачи с эффективными решениями, реализуемые в соответствующих подсистемах САУ<sub>уст</sub> (или базовых объединениях ее функциональных элементов) на этапах информационного обеспечения, подготовки, принятия и реализации решений на иерархических уровнях управления; когнитивным анализом целей и рефлексивным синтезом процессов целеполагания с привлечением возможностей специализированной интеллектуальной системы поддержки принятия решений для усиления креативно-рефлексивных способностей субъекта управления и повышения уровня его профессиональных компетенций; совмещением универсальности этапов рациональных управления синтезом стратегии управления процессами РЭЗ со спецификой конфликтных ситуаций, субъектностью, когнитивностью и рефлексивным характером интеллектуального управления. Представлены способы и средства частичной формализации процессов целеполагания, когда структурирование главной цели производится с учетом принадлежности к стратегиям внутреннего и внешнего управления РЭЗ, декомпозиции 2-хсторонней динамической модели конфликта между системами комплекса РЭП и РЛС, иерархии уровней управления, применяемых различных подходов к целеполаганию в кризисном управлении, а также методов обоснования целей, затрат ресурсов и контроля качества достижения поставленных целей. Эти особенности позволяют существенно снизить степень субъективности управляющих решений для целеполагания и добиться их обоснованности, полноты, непротиворечивости и согласованности.

**Ключевые слова:** система управления; конфликтная ситуация; неопределенность; устойчивость; целеполагание; принятие решений, радиоэлектронная защита.

### **Peculiarities of purpose in providing the information stability of surveillance radar sensing modes in the process of their radio electronic suppression**

Valery Kantsedal, Anatoly Mogyla

**Abstract.** It is possible to look at the special features of the goal setting while ensuring information stability of radar sounding modes when they are suppressed by the active interferences and interfering information influences. Overcoming the complexity of goal-setting processes, the validity and prompt decision-making with a shortage of time for its adoption is associated with insuring the consistency of goal-setting the levels of their intellectualization and formalization. This will contribute to imparting the desired properties, synthesized during the conflict, to the multipurpose strategies and the situational law of the control of the REP processes and the coordination of actions. An increase in the level of intellectualization of goal-setting processes is ensured by: decomposition of the general goal-setting problem into separate, simpler subtasks with effective solutions, implemented in the corresponding subsystems of the ACS<sub>stab</sub> (or basic associations of its functional elements) at stages of information support, preparation, adoption and implementation of the decision at the stages of hierarchical levels of management; cognitive analysis of goals and reflexive synthesis of goal-setting processes using the capabilities of a specialized intelligent decision support system to enhance the creative-reflexive abilities of the subject of management and increase the level of his professional competencies; combining the universality of the stages of rational management of the synthesis of the strategy for managing the REP processes with the specifics of conflict situations, subjectivity, cognition and reflexivity nature of intellectual control. Methods and means of partial formalization of goal-setting processes are presented, when the structuring of the main goal is carried out taking into account belonging to the strategies of internal and external control of the REP, the decomposition of the two-sided dynamic model of the conflict between the systems of the RES complex and the radar, the hierarchy of management levels, various approaches applied to goal-setting in a crisis management, as well as methods of justifying goals, resource costs and control of achieving the goals. These features can significantly reduce the degree of subjectivity of management for goal-setting and achieve their validity, completeness, consistency.

**Keywords:** control system; conflict situation; uncertainty; stability; goal setting; decision making. electronic protection.

Alexander Serhieiev<sup>1</sup>, Andriy Krivoshapka<sup>1</sup>, Oleksandr Isakov<sup>1</sup>,  
Vyacheslav Lysenko<sup>1</sup>, Viktor Moskalenko<sup>1</sup>, Sergiy Burdin<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> State boarding school with enhanced military and physical training “Cadet Corps” Kharkiv, Ukraine

## MATHEMATICAL AND PHYSICAL BASIS FOR DEVELOPING A SIMULATOR FOR TOWING AND PULLING OF WHEELED AND TRACKED MACHINES

**Abstract.** The subject matter of the article is the towing and pulling of wheeled and tracked vehicles with the use of cable ropes and dynamic slings. The goal of the study is to determine the mathematical and physical basis for the development of a simulator for towing and pulling wheeled and tracked vehicles for researching to study the possibility of using aramid fibers of cable-ropes and dynamic slings. The tasks to be solved are: based on the analysis of the main roads and ground characteristics to formalize the list of calculated parameters and physical quantities determine the amount of evacuation work when pulling, towing and transporting wheeled and tracked vehicles; to develop a mathematical model that describes the process of pulling and towing wheeled and tracked vehicles using cable ropes and dynamic slings. General scientific and special methods of scientific knowledge are used. The following results are obtained. By analyzing the main characteristics of roads and ground, a formalized list of design parameters and physical quantities that determine the volume of evacuation work during the towing and pulling of wheeled and tracked vehicles was obtained. Mathematical model, describes the process of pulling and towing wheeled and tracked machines using cable ropes and dynamic slings have been compiled as a system of equations with different order. analyzed existing technology for the production of aramid fibers, their strengths and weaknesses, and formed a research polygon with regard to the peculiarities of the operation of wheeled and tracked vehicles. Existing technology for the production of aramid fibers, their strengths and weaknesses, and formed a research polygon with regard to the peculiarities of the operation of wheeled and tracked vehicles have been analyzed. **Conclusions.** The main roads and ground characteristics that determine the vehicles. evacuation conditions are the following: the type of road or ground, their possibility depending on the season and precipitation, the presence of ascents and descents, as well as the nature of road (ground) interaction with caterpillars determined by resistance coefficients. movement and traction. The mathematical model of pulling a wheeled and tracked vehicle using cable ropes and dynamic can be presented as a system of equations: the jerk carried out by the machine in time reflected third-order differential equation, assuming that all the energy accumulated by the cable is numerically equal to the work of moving stuck machine, corresponds to the equality of the corresponding integrals; the properties of aramid fibers that affect the strength and performance characteristics of cable ropes can be formally expressed through the elongation of the cable. Analysis of strength and service properties of aramid fibers opens the way to improvement of manufacturing technology of cable ropes and dynamic slings for pulling and towing of wheeled and tracked vehicles.

**Keywords:** towing and pulling of wheeled and tracked vehicles; cable ropes and dynamic slings; strength and performance characteristics of aramid fibers; the mathematical model of pulling a wheeled and tracked vehicle.

### Introduction

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

It is well known that the immediate evacuation of wheeled and tracked vehicles (WTV), in particular armored weapons and military equipment (AMWE), facilitates the rapid return of the equipment to action and, in the time of combat, also prevents it from being destroyed or captured by the enemy. Vehicle recovery is a complex technical task which is often hindered by the use of towing cables with their lack of strength and serviceability. Traditionally, steel cables left over from the Soviet Army are used to evacuate vehicles. The appropriate method of AMWE evacuation relevant at that time and designed for low-skilled personnel, is not only time- and resource-intensive and non-ergonomic, but also very dangerous. At the same time, the emergence of new technologies in the production of tow ropes and dynamic slings has expanded the possibilities of use for the manufacture of the last fibers with more attractive performance and strength properties.

Modern aramid fibers have the highest tensile strength and modulus of elasticity, if we consider the ratio of these indicators to their density. They are resistant to most conventional organic solvents, combustibles and lubricants. Under the action of very

strong acids and alkalis, its strength decreases, but it is more resistant to corrosion factors, such as salt water. Therefore, the possibility of using cable-ropes made of modern aramid fibers for pulling and towing AMWE require additional research. It is clear that the cost of field experiments due to their destructive nature is too high. Physical modeling is also not a suitable method of analyzing the effectiveness of hostilities due to the difficulty of finding an adequate physical analogue to the processes that take place during hostilities.

Thus, the actual is problem to develop new methods of evaluation of the use of existing technologies both to assess the feasibility and to identify methods of using aramid fibers cable-ropes and dynamic slings for the towing and pulling the coils.

**Analysis of recent research and publications** on the above issues shows the relevance of the study. The order of organization of evacuation of tanks, methodology of calculation of tractive forces for different types of jams; order of loading of tanks on vehicles are presented almost without changes in textbooks that have been published during the last ten years [1, 2]. The material submitted in the style of advice and instructions, of course, is easy to digest, but does not reveal the mathematical and physical principles of towing and hauling of wheeled and tracked machines



and, The design is not intended to be used as a basis for investigating the feasibility of using aramid fiber cable ties and dynamical slings.

The methodology for calculating the forces acting on the towing objects from the side of the towing link used in the modeling of the towing process, has been considered quite thoroughly for marine objects [3], but its use for WTV samples requires some refinement due to the specific conditions of the application.

**The goal** of the study is to determine the mathematical and physical basis for the development of a simulator for towing and pulling wheeled and tracked vehicles for researching to study the possibility of using aramid fibers of cable-ropes and dynamic slings. To achieve this goal the following **research tasks** are solved:

- based on the analysis of the main roads and ground characteristics to formalize the list of calculated parameters and physical quantities determine the amount of evacuation work when pulling, towing and transporting wheeled and tracked vehicles;

- to develop a mathematical model that describes the process of pulling and towing wheeled and tracked vehicles using cable ropes and dynamic slings;

- to analyze the existing technologies for the production of aramid fibers, their advantages and disadvantages, and to draw conclusions about the feasibility of additional processing of aramid fibers, given the peculiarities of the operation of wheeled and tracked vehicles.

## Main material

**1. Roads and ground characteristics and a list of calculated parameters and physical quantities that determine the evacuation work amount during the towing and pulling WTV samples.** The nature and scope of evacuation work during the towing and pulling of WTV samples largely depend on the condition of roads and ground. The main roads and ground characteristics that determine the vehicles. evacuation conditions are the following: the type of road or ground, their possibility depending on the season and precipitation, the presence of ascents and descents, as well as the nature of road (ground) interaction with caterpillars determined by resistance coefficients. movement and traction.

To compile the differential equations of the process of pulling and towing wheeled and tracked machines, we will use the following provisions. The possibility of machines on all ground is determined by the coefficients of adhesion and drag.

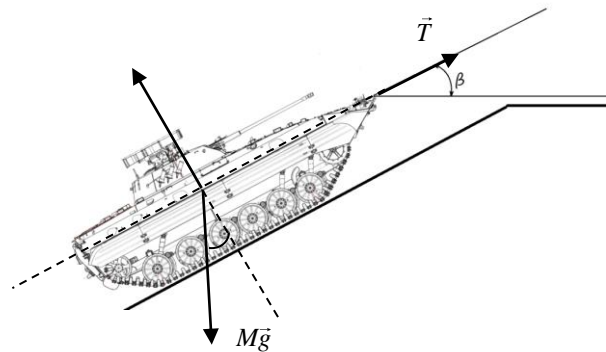
The resistance to movement resulting from the interaction of the tracked vehicle with the ground and ground deformation is characterized by the drag coefficient  $f$ . The resistance of the WTV caterpillar depends on the design parameters of the caterpillar, the cost of friction in the chassis and some transmission units, ground quality and speed.

The greatest force with which the ground keeps the tracks from slipping is called the traction force by traction, which is characterized by the track-to-gravel coefficient  $\varphi$ . The traction coefficient depends on the quality of the ground, the specific pressure of the

crawler and the design of the tracks. The drag and traction coefficients for the tracked vehicles for the most typical road conditions obtained by experiment [1, 2, 4].

## 2. Mathematical model for the evacuation of wheeled and tracked vehicles using cable ropes and dynamic slings.

**2.1.** To successfully carry out evacuation work, it is necessary to correctly determine the traction forces required for the towing and pulling of the WTV and the evacuation capabilities of the available traction means. Let a vehicle of mass  $M$  get stuck, having gone deep into the ground with certain characteristics to a depth  $h$ , having an angle of inclination  $\alpha$  and an divergence angle of the tractive effort with the direction of movement  $\beta$  (Fig. 1).



**Fig. 1.** Forces acting on the WTV sample during towing and pulling

When towing and pulling the machine, it is necessary to overcome the resistance force  $R$ , which depends on many reasons - technical condition of the machine, ground conditions, depth of the jam, angle of inclination, etc. According to [1], the value of  $R$  is calculated as the sum of the main resistance (the so-called ground drag)  $R_1$  and the additional resistance  $R_2$

$$R = R_1 + R_2, \quad (1)$$

where  $R_1$  takes into account the takes into account sliding friction on the ground  $f$ , the ground tilt angle  $\alpha$  and the depth  $h$ .

$R_2$  takes into account the difference between the tractive force strength and the angle deviation machine's displacement strength  $\beta$ , the additional length at continuous stalling or at hardening or shrinking of the ground; the coefficient of aggregation with the ground in case of jamming of the running gear of the machine.

For example (Fig. 1), will consider for the car with a serviceable running gear:

$$R_1 = Mg(f \cos \alpha + \sin \alpha). \quad (2)$$

When jamming the running gear  $R_1$  is determined by the formula:

$$R_1 = Mg(\varphi \cos \alpha + \sin \alpha), \quad (3)$$

here  $M$  – mass of the vehicle;  $f$  and  $\varphi$  – the coefficients of resistance to motion and adhesion, respectively.

**2.2.** Assume that the machine is pulled and towed by a tractor, the traction capabilities of which allow you to create traction on the hook of the tractor in these road conditions. This force is transmitted by a cable whose

pulling force  $T$  acts on the machine. When pulling and towing, the machine will move with acceleration  $\vec{a}$ .

Based on this, according to Newton's second law, we can write:

$$\vec{T} + M\vec{g} + \vec{R} = M\vec{a} \tag{4}$$

Expression (4) neglects the mass of the cable itself. Taking into account the mass of the cable  $m$ , it will look like

$$\vec{T} + (M + m)\vec{g} + \vec{R} = M\vec{a},$$

Here  $T$  – cable pulling force;  $R$  – resistance force;  $a$  – machine acceleration;  $M$  – vehicle's mass;  $m$  – cable's mass;  $g$  – acceleration of gravity.

If we assume that the cable has length  $l$  and is made of a material with density  $\rho$ , then the expression (4) will have the form

$$\vec{T} + (M + \rho l)\vec{g} + \vec{R} = M\vec{a}. \tag{5}$$

Pulling and towing can be done jerkily. This means the volatility of the acceleration can over time. From time to time the machine will pass the distance  $S$ , changing its position  $x(t)$ . Given that

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2x(t)}{dt^2}, \tag{6}$$

the (5) can be designed and written in scalar form:

$$T - ((M + \rho l S)g \sin \beta + R \cos \beta) = M \frac{d^2x}{dt^2}, \tag{7}$$

here  $f$  – sliding friction on the ground;  $\alpha$  – the ground tilt angle;  $\beta$  – angle deviation machine's displacement strength;  $T$  – cable pulling force;  $R$  – resistance force;  $l$  – cable's length;  $\rho$  – cable's density.  $S$  – rope diameter.

In these calculations it is assumed that the rope consists of one strand. If a cable is stranded with  $n$ , then the tension is multiplied by  $n$ .

At the same time, the force  $T$  is also not constant, because the cable has damping properties. We will assume that all the energy accumulated by the cable-cable is numerically equal to the work of moving the stuck vehicle. In analytical form, this equality will look like

$$\int_l^{l+\Delta l} T dl = \int_{x_{in}}^{x_f} (M \frac{d^2x}{dt^2}) dx, \tag{8}$$

here  $x_{in}$  – initial position of the vehicle;  $x_f$  – final position of the vehicle;  $M$  – mass of the vehicle;  $T$  – cable pulling force.

After transforming the formula, we get

$$\begin{aligned} \int_l^{l+\Delta l} T dl &= \int_{x_{in}}^{x_{kin}} (M \frac{d^2x}{dt^2}) dx = \int_{t_{noy}}^{t_{kin}} M \frac{d^2x}{dt^2} v(t) dt = \\ &= \int_{t_{in}}^{t_f} M \frac{d^2x}{dt^2} \int_{t_{in}}^{t_f} \frac{dx}{dt} dt = \int_{t_{in}}^{t_f} \int_{t_{in}}^{t_f} M \frac{d^3x}{dt^3} dt = \\ &= M \int_{t_{in}}^{t_f} \int_{t_{in}}^{t_f} j(t) dt, \end{aligned} \tag{9}$$

here  $j(t) = \frac{d^3x}{dt^3}$  – a jerk made by the vehicle in time [5, 6].

2.3. In general, the cable pulling force  $T$  is defined

$$T = \sigma S, \tag{10}$$

here  $\sigma$  – is the mechanical tensile stress of the cable material,  $N/mm^2$ .

The value  $\sigma$  is determined by the characteristic of the material forming the research set.

The expression (10) can be written taking into account the relative elongation of the cable:

$$T = E\varepsilon S = E \frac{\Delta l}{l} S. \tag{11}$$

Here  $E$  – Jung's module;  $\varepsilon$  – the relative elongation of the cable.

2.4. If a cable with a length  $l$  has an absolute elongation  $\Delta l$ , then its relative elongation is equal to

$$\varepsilon = \Delta l / l \tag{12}$$

A cable made of synthetic material, when deformed, has an elongation

$$\Delta l = l \left( \sqrt{\frac{l_m}{aT_b}} - \sqrt{\frac{T}{aT_b}} \right), \tag{13}$$

here  $l$  – cable-rope length;  $T_m$  – the maximum allowable tension in the cable-rope;  $T$  – the working load of the cable-rope;  $T_b$  – breaking strength of the cable rope;  $a$  – dimensionless coefficient depending on the material and construction of the rope [3, 7, 8].

Aramid fibers have different trade names. The values of the coefficient  $a$  are presented in table 1

Table 1 – Values of coefficient  $a$

Type of rope	Polymer name	Coefficient value $a$
Braided eight stranded	Polyamide	3,5
	Polypropylene	11
	Polyester	11
Twisted eight-strand	Polyamide	2,8
	Polypropylene	8
	Polyester	7,5

**3. Use of aramid fibers in the production of cable ropes and dynamic slings for towing and pulling of vehicles.** In the authors' opinion, researches of various technologies of aramid fibers additional treatment with usage of high-molecular hydrocarbons can be considered perspective.

Thus, analysis of strength and service properties of aramid fibers opens the way to improvement of manufacturing technology of cable ropes and dynamic slings for pulling and towing of WTVs.

Aramid fibers form a completely new and separate category of organic fibers. Fibers in this category have the highest tensile strength and modulus of elasticity as measured by their ratio of strength to density. They are resistant to most common organic solvents, combustibles and lubricants.

When exposed to very strong acids and alkalis, its strength decreases, but it has greater resistance to

corrosive factors like salt water. The authors analyzed existing technology for the production of aramid fibers, their strengths and weaknesses, and formed a research polygon with regard to the peculiarities of the operation of wheeled and tracked vehicles.

Particular attention should be paid to the harmful effects of ultraviolet light, atmospheric phenomena and lubricating contaminants. It is found out that necessary breaking force of aramid cable-rope is provided by less number of threads in accordance with high tensile strength. Moreover, the weight of a cable made of aramid fiber is estimated to be 5 to 6 times less than the weight of steel fiber, which is crucial for the actions of the vehicle crew.

However, for aramid fibers, the most aggressive substances are those in contaminated air. It follows that active ultraviolet light and atmospheric precipitation will have a negative effect on the performance characteristics of the cable ropes. To mitigate such impact, cable-rope production technology requires improvements in terms of acquisition of certain properties of chemical fibers or additional treatment of fibers produced by existing technologies. For this purpose the authors have analyzed physicochemical peculiarities and mechanism of formation of web fibers.

The main differences in the process of their formation include enzymatic biosynthesis by matrix block-copolypeptide with a given sequence of amino acid

residues; the formation of fibroin filaments occurs at high speed by crystallization oriented in the axial mechanical field; the process of polypeptide synthesis and filament formation can be considered as isothermal [9-13].

## Conclusions

The main roads and ground characteristics that determine the vehicles' evacuation conditions are the following: the type of road or ground, their possibility depending on the season and precipitation, the presence of ascents and descents, as well as the nature of road (ground) interaction with caterpillars determined by resistance coefficients, movement and traction.

The mathematical model of pulling a wheeled and tracked vehicle using cable ropes and dynamic can be presented as a system of equations: the jerk carried out by the machine in time reflected third-order differential equation, assuming that all the energy accumulated by the cable is numerically equal to the work of moving stuck machine, corresponds to the equality of the corresponding integrals; the properties of aramid fibers that affect the strength and performance characteristics of cable ropes can be formally expressed through the elongation of the cable.

Analysis of strength and service properties of aramid fibers opens the way to improvement of manufacturing technology of cable ropes and dynamic slings for pulling and towing of WTVs.

## REFERENCES

- (1971), *Tank Evacuation Guide*, Voennoye izdatel'stvo Ministerstva oborony SSSR, Moscow, SU.
- (1981), *Armored Vehicle Evacuation Guide*, Voennoye izdatel'stvo Ministerstva oborony SSSR, Moscow, SU.
- Sergeyev, L.V. (1973), *Tank theory*, Voennoyaya akademiya bronetankovykh voysk, Moscow, SU.
- (1984), *Praktika upravleniya morskim transportnym sudnom*. V/O "Mortekhinformreklama", Moscow, SU.
- Savelyev, I.V. (1989), *Physics course*. Volume 1. Mechanics. Molecular physics], Nauka, Moscow, SU.
- Gragert, S. (1998), *What term is used to refer to the third derivative position?* Usenet Frequently Asked Questions on Physics and Relativity, available at: <https://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/jerk.html>
- Gurtov, V. A. and Osaulenko, R. N. (2007), *Solid-state physics for engineers: tutorial*, Tekhnosfera, Moscow, 520 p.
- Yudin, Yu. I., Pashentsev, S. V. and Kayan, V. V. (2013), "Calculation of the forces acting on towing objects from the side of the towing connection", *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, vol. 16, pp. 193-196.
- Klare, H. (1985), *Geschichte der Chemiefaserrforschung*, Akademie-Ferlag, Berlin, DE.
- Froyde, M. (1982), *Zhivotnyye stroyat* [Tiere Bauen], Translated by Zakharov, A. (1986) (ed.), Mir, Moscow, SU.
- Perepelkin, K. Ye. (2007), "Physicochemical features of natural fibroin filament formation", *Izv. VUZov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, vol. 50, no.11, pp. 3-13.
- Kostyuk, S. O. (1978), "On the structure of natural silk", *Voprosy fiziko-khimii i tekhnologii natural'nogo shelka*, Tashkentskiy politekhnicheskii institute, Tashkent, SU.
- BMP-2. Boyevaya mashina pekhoty BMP-2. Tekhnicheskoye opisaniye i instruktsiya po ekspluatatsii. Kniga 2. (1986), Voennoye izdatel'stvo Ministerstva oborony SSSR, Moscow, SU.

Received (Надійшла) 11.10.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.11.2021

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Сергєєв Олександр Сергійович** – заступник начальника інституту, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна.

**Alexander Serhieiev** – Deputy Chief of the Military Institute of Tank Troops, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [bmbylat@ukr.net](mailto:bmbylat@ukr.net); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9833-9851>

**Кривошапка Андрій Іванович** – викладач кафедри озброєння та стрільби, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна.

**Andriy Krivoshapka** – Lecture of Arms and Firing Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [dolphin090275@gmail.com](mailto:dolphin090275@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9065-2616>

**Ісаков Олександр Володимирович** – заступник начальника кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;

**Oleksandr Isakov** – Senior Lecture of the Armored vehicles and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [alexalex999@ukr.net](mailto:alexalex999@ukr.net); ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0801-790X>.

**Лисенко Вячеслав Олегович** – курсант кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету “ХПІ”, Харків, Україна;

**Vyacheslav Lysenko** – Cadet of the Armored weapons and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [dedboys86@gmail.com](mailto:dedboys86@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4855-8869>

**Москаленко Віктор Іванович** – доцент кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету “ХПІ”, Харків, Україна;

**Viktor Moskalenko** – Associate Professor of the Armored vehicles and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [kaf\\_ing\\_fvp@ukr.net](mailto:kaf_ing_fvp@ukr.net); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4183-7953>.

**Бурдін Сергій Вікторович** – вчитель фізики, Державна гімназія-інтернат “Кадетський корпус”, Харків, Україна;

**Sergiy Burdin** – Physics teacher, State boarding school “Cadet Corps”, Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [fisservik@ukr.net](mailto:fisservik@ukr.net); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9946-7545>

### Математичне та фізичне підґрунтя для розроблення симулятора витягування і буксування колісних та гусеничних машин

О. С. Сергєєв, А. І. Кривошапка, А. В. Ісаков, В. О. Лисенко, В. І. Москаленко, С. В. Бурдін

**Анотація.** Предметом вивчення статті є витягування і буксування колісних та гусеничних машин із застосуванням кабель-тросів та динамічних строп. **Метою дослідження** є визначення математичного та фізичного підґрунтя для розроблення симулятора буксування і витягування колісних та гусеничних машин для дослідження можливості використання арамідних волокон кабель-тросів та динамічних строп. **Завдання дослідження:** На основі аналізу основних характеристик доріг і ґрунтів формалізувати перелік розрахункових параметрів та фізичних величин, що визначають обсяг евакуаційних робіт при витягуванні, буксуванні і транспортуванні колісних та гусеничних машин. Скласти математичну модель, що описує процес витягування та буксування колісних та гусеничних машин із застосуванням кабель-тросів та динамічних строп. **Отримані такі результати.** Шляхом аналізу основних характеристик доріг і ґрунтів отриманий формалізований перелік розрахункових параметрів та фізичних величин, що визначають обсяг евакуаційних робіт при витягуванні, буксуванні і транспортуванні колісних та гусеничних машин. Математична модель, описує процес витягування та буксування колісних та гусеничних машин із застосуванням кабель-тросів та динамічних строп складена як система рівнянь. Проаналізовані існуючі технології виробництва арамідних волокон, їх переваги та недоліки, та сформований полігон досліджень з огляду на особливості колісних та гусеничних машин. **Висновки.** Основними характеристиками доріг і ґрунтів, які визначають умови евакуації машин, є вид дороги або ґрунту, їх прохідність в залежності від пори року і атмосферних опадів, наявність підйомів і спусків, а також характер взаємодії дороги (ґрунту) з гусеницями машини, що визначається коефіцієнтами опору руху і зчеплення. Математична модель витягування колісних та гусеничних машин із застосуванням кабель-тросів та динамічних строп подана як система рівнянь. Аналіз міцностних та експлуатаційних властивостей арамідних волокон відкриває шлях до удосконалення технології виготовлення кабель-тросів та динамічних строп для буксування і витягування колісних та гусеничних машин.

**Ключові слова:** витягування та буксування колісної та гусеничної техніки; кабель-троси та динамічні стропи; експлуатаційні характеристики арамідних волокон; математична модель витягування колісної та гусеничної техніки.

### Математические и физические основы для разработки симулятора вытягивания и буксирования колесных и гусенических машин

А. С. Сергеев, А. И. Кривошапка, А. В. Исаков, В. О. Лысенко, В. И. Москаленко, С. В. Бурдин

**Аннотация.** Предметом изучения в статье является извлечение и буксование колесных и гусеничных машин с применением кабелей-тросов и динамических строп. **Целью исследования** является определение математической и физической основы для разработки симулятора буксировки и извлечения колесных и гусеничных машин для исследования возможности использования арамидных волокон кабель-тросов и динамических строп. **Задачи исследования:** на основе анализа основных характеристик дорог и грунтов формализовать перечень расчетных параметров и физических величин, определяющих объем эвакуационных работ при извлечении, буксировке и транспортировке колесных и гусеничных машин. Составить математическую модель, описывающую процесс извлечения и буксировки колесных и гусеничных машин с применением кабелей-тросов и динамических строп. **Получены следующие результаты.** Путем анализа основных характеристик дорог и грунтов получен формализованный перечень расчетных параметров и физических величин, определяющих объем эвакуационных работ при извлечении, буксировке и транспортировке колесных и гусеничных машин. Математическая модель, описывающая процесс извлечения и буксировки колесных и гусеничных машин с применением кабель-тросов и динамических строп, составлена как система уравнений. Проанализированы существующие технологии производства арамидных волокон, их преимущества и недостатки и сформирован полигон исследований с учетом особенностей колесных и гусеничных машин. **Выводы.** Основными характеристиками дорог и грунтов, определяющих условия эвакуации машин, являются вид дороги или грунта, их проходимость в зависимости от времени года и атмосферных осадков, наличие подъемов и спусков, а также характер взаимодействия дороги (почвы) с гусеницами машины, определяемый коэффициентами сопротивления движения и сцепления. Математическая модель вытягивания колесных и гусеничных машин с применением кабель-тросов и динамических строп может быть представлена как система уравнений. Анализ прочностных и эксплуатационных свойств арамидных волокон открывает путь к усовершенствованию технологии изготовления кабель-тросов и динамических строп для буксования и извлечения колесных и гусеничных машин.

**Ключевые слова:** вытягивание и буксование колесной и гусеничной техники; кабель-тросы и динамические стропы; эксплуатационные характеристики арамидных волокон; математическая модель извлечения колесной и гусеничной техники.