



Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"



Сучасні Інформаційні Системи

Advanced Information Systems

Sučasni informacijni sistemi

Том 5, № 2

Volume 5, No. 2

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 28 травня 2021 року № 5).*

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., Шeverdін І. В., Гейко Г. В.*
Оцінка інформативності та вибір ознак
при ідентифікації стану комп'ютерної системи 5
- Гороховатський В. О., Власенко Н. В.,
Рибалка М. О.*
Застосування засобів хешування даних для прискорення
класифікаційних рішень у структурних методах
розпізнавання зображень 13

МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

- Коваленко С. П., Герасимов С. В., Волков А. Ф.,
Корсунів С. І., Оборонів М. І.*
Модель оцінювання ефективності підрозділів
протиповітряної оборони 21
- Кононов В. Б., Кононова О. А.,
Мусаїрова Ю. Д.*
Використання електромеханічних аналогій
при побудові та розрахунку імітаційної моделі
процесу крутильних коливань валопроводу
двигуна внутрішнього згорання 29
- Левченко Л. О.*
Моделювання просторових поширень магнітних полів
наднизької частоти множинних джерел 34
- Мошаренков В. В., Войтенко С. С.*
Розробка узагальненої математичної моделі
статичної похибки електромеханічних
засобів вимірювальної техніки 38

МЕТОДИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ

- Бутко І. М.*
Модель та метод прийняття управлінських рішень
на основі аналізу геопросторової інформації рішень 42
- Собчук В. В., Замрій І. В.,
Олімпієва Ю. І., Лантєв С. О.*
Функціональна стійкість технологічних процесів
на основі нелінійної динаміки із
застосуванням нейромереж 49

МЕТОДИ СИНТЕЗУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

- Андрєєв С. М., Жилін В. А.,
Сабадош А. Л.*
Застосування геоінформаційних технологій
для організації пасажиропотоків в аеропортах
в умовах карантинного зонування 58
- Андрусевич В. А., Обод І. І.*
Оцінка якості інформаційного забезпечення
радіолокаційними системами спостереження
повітряного простору (eng.) 78
- Раскін Л. Г., Сіра О. В.,
Парфенюк Ю. Л., Сухомлин Л. В.*
Структурна оптимізація у багатоканальній
розподіленій системі масового обслуговування (eng.) ... 83

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

- Барсов В. І., Костерна О.Ю., Плахотний О.В.*
Дослідження методу підвищення точності
визначення об'єкта на відеопотоці
низької роздільної здатності (eng.) 91
- Бездельний В. В., Шевченко С. О., Грідасов І. О.*
Експериментальне визначення рівня початкової
турбулентності в робочій частині аеродинамічної труби
Т-1 Харківського національного університету
Повітряних Сил імені Івана Кожедуба (eng.) 98

TABLE OF CONTENTS

PROBLEMS OF IDENTIFICATION IN INFORMATION SYSTEMS

- Svitlana Gavrylenko, Illia Sheverdin, Hennadii Heiko*
Informativity assessment and attributes selection
in a computer system state identification (ukr.) 5
- Volodymyr Gorokhovatskyi, Nataliia Vlasenko,
Mykhailo Rybalka*
Application of data hashing tools to accelerate
classification decisions in structural image
recognition methods (ukr.) 13

INFORMATION SYSTEMS MODELING

- Serhii Kovalenko, Sergey Herasimov, Andriy Volkov,
Serhii Korsunov, Mykola Oboronov*
Model for assessing the efficiency of department's
anti-air defense (ukr.) 21
- Volodymyr Kononov, Olena Kononova,
Yulia Musairova*
Use of electromechanical analogies in the construction
and calculation of a simulation model of the process
of torsional oscillations of the shaft line
of an internal combustion engine (ukr.) 29
- Larysa Levchenko*
Modeling the spatial distribution of magnetic fields
35of low frequency multiple sources (ukr.) 34
- Viktor Mosharenkov, Serhii Voitenko*
Development of a generalized mathematical model
of static error electromechanical measuring
equipment (ukr.) 38

ADAPTIVE CONTROL METHODS

- Ihor Butko*
Model and method of making management decisions
based on the analysis of geospatial information (ukr.)..... 42
- Valentyn Sobchuk, Iryna Zamrii,
Yuliya Olimpiyeva, Serhii Laptiev*
Functional stability of technological processes
based on nonlinear dynamics with the application
of neural networks (ukr.) 49

METHODS OF INFORMATION SYSTEMS SYNTHESIS

- Sergey Andrieiev, Volodymyr Zhilin,
Anastasiia Sabadosh*
Application of geoinformation technologies
for organizing passenger traffic at airports
in conditions of quarantine zoning (ukr.) 58
- Volodymyr Andrusevich, Ivan Obod*
Assessment of the quality
of information support by air radar
surveillance systems 78
- Lev Raskin, Oksana Sira,
Yurii Parfenyuk, Larysa Sukhomlyn*
Structural optimization in a multi-channel
distributed mass service system 83

INFORMATION SYSTEMS RESEARCH

- Valeriy Barsov, Oleksandr Plakhotnyi, Olena Kosterna*
Research of the method of increasing the object
determination accuracy on the low-resolution
video stream 91
- Vitalii Bezdielnyi, Serhii Shevchenko, Illia Hridasov*
Experimental determination of the level of incipient
turbulence in the working part of the T-1
wind tunnel of Ivan Kozhedub Kharkiv
national Air Force University 98

<i>Зінченко О. В., Вишнівський В. В., Березовська Ю. В., Седлачек П.</i> Ефективність функціонування комп'ютерних мереж із SDN в умовах неповноти інформації про надійність (eng.)	103	<i>Olha Zinchenko, Viktor Vyshnivskiy, Yuliia Berezovska, Peter Sedlaček</i> Efficiency of computer networks with SDN in the conditions of incomplete information on reliability	103
<i>Коваленко А. А., Ляшенко О. С., Ярошевич Р. О.</i> Порівняльний аналіз організації хмарної інфраструктури	108	<i>Andriy Kovalenko, Oleksii Liashenko, Roman Yaroshevych</i> Comparative analysis of the organization of cloud infrastructure (ukr.)	108
<i>Кучук Н. Г., Шефер О. В., Чернева Г. П., Алнаєрі Фрхат Алі</i> Визначення пропускних здатностей самовідновлювального сегмента мережі	114	<i>Nina Kuchuk, Oleksandr Shefer, Galina Cherneva, Alnaeri Frhat Ali</i> Determining the capacity of the self-healing network segment (ukr.)	114
<i>Сакович Л. М., Криховецький Г. Я., Міхін О. В., Мирошніченко Ю. В.</i> Оцінка впливу метрологічного та діагностичного забезпечення на технічне обслуговування за станом засобів зв'язку	120	<i>Lev Sakovych, Heorhii Krykhovetskyi, Oleksandr Mikhin, Iurii Myroshnychenko</i> Estimation of influence of the metrology and diagnostic providing on technical service on the state communication means (ukr.)	120
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ		INTELLIGENT INFORMATION SYSTEMS	
<i>Олізаренко С. А., Радченко В. О.</i> Метод визначення семантичної подібності текстів довільної довжини за допомогою моделі з використанням моделей Transformers (eng.)	126	<i>Serhii Olizarenko, Viacheslav Radchenko</i> Method for determining the semantic similarity of arbitrary length texts using the Transformers models	126
МЕТОДИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ		METHODS OF INFORMATION SYSTEMS PROTECTION	
<i>Євсєєв С. П., Корольов Р. В., Ткачов А. М., Німченко А. Є.</i> Розробка процедур модифікації шифру ГОСТ 28147 (eng.)	131	<i>Serhii Yevseiev, Roman Korolyov, Andrii Tkachov, Anastasiya Nimchenko</i> Development of procedures for modifying the cipher GOST 28147	131
<i>Чжан Ліцян, Цао Вейлін, Рабчан Я., Давидов В. В., Мірошніченко Н. М.</i> Аналіз і порівняльне дослідження методів тестування програмного забезпечення на проникнення (eng.)	136	<i>Zhang Liqiang, Cao Weiling, Jan Rabčan, Viacheslav Davydov, Natalia Miroshnichenko</i> Analysis and comparative studies of software penetration testing methods	136
ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ		APPLIED PROBLEMS OF INFORMATION SYSTEMS OPERATION	
<i>Андрєєв В. О., Чорнобай В. М., Бабкін Ю. В., Таран О. В., Кот В. В., Аненкова О. В.</i> Аналіз можливості використання акумуляторних батарей новітніх технологій на зразках бронетанкового озброєння та військової техніки (eng.)	141	<i>Volodymyr Andryeyev, Valentyn Chernobai, Yurii Babkin, Olha Taran, Vladimir Kot, Olena Anenkova</i> Analysis of the possibility of using batteries of the latest technologies on samples of armored weapons and military equipment	141
<i>Пашаєв А. Б., Сабзієв Е. Н., Гасанов А. Г.</i> Завдання перерозподілу радіочастот, що використовуються в підрозділах експлуатації (eng.)	148	<i>Adalat Pashayev, Elkhan Sabziev, Arif Hasanov</i> The problem of redistribution of radio frequency used in the organization divisions	148
<i>Талібов А. М., Гулієв Б. В.</i> Методика оцінки військово-економічних показників розташування логістичного центру при передислокації військ (eng.)	152	<i>Aziz Talibov, Bakhtiyar Guliyev</i> A method for assessing the military-economic indicators with the purpose of locating a logistics center for redeploying troops	152
<i>Ткачов В. М., Коваленко А. А., Кучук Г. А., Ні Я. С.</i> Метод забезпечення живучості високомобільної комп'ютерної мережі	159	<i>Vitalii Tkachov, Andriy Kovalenko, Heorhii Kuchuk, Iana Ni</i> Method of ensuring the survivability of highly mobile computer networks (ukr.)	159
Алфавітний покажчик	166	Alphabetical index	166

✦

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

Географія статей цього номера



Азербайджан
Azerbaijan



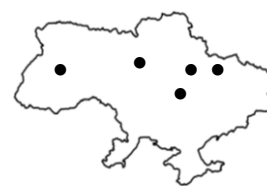
Болгарія
Bulgaria



Китай
China



Словаччина
Slovakia



Україна
Ukraine

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Алнаєрі Фрхат Алі (Alnaeri Frhat Ali)	114	Ляшенко О. С. (Oleksii Liashenko)	108
Андрєєв В. О. (Volodymyr Andryeyev)	141	Мирошніченко Ю. В. (Iurii Myroshnychenko) ..	120
Андрєєв С. М. (Sergey Andrieyev)	58	Мірошніченко Н. М. (Natalia Miroshnychenko) .	136
Андрусевич В. А. (Volodymyr Andrusevich)	78	Міхін О. В. (Oleksandr Mikhin)	120
Аненкова О. В. (Olena Anenkova)	141	Мошаренков В. В. (Viktor Mosharenkov)	38
Бабкін Ю. В. (Yurii Babkin)	141	Муцайрова Ю. Д. (Yulia Musairova)	29
Барсов В. І. (Valeriy Barsov)	91	Ні Я. С. (Iana Ni)	159
Бездельний В. В. (Vitalii Bezdilnyi)	98	Німченко А. Є. (Anastasiya Nimchenko)	131
Березовська Ю. В. (Yuliia Berezovska)	103	Обод І. І. (Ivan Obod)	78
Бутко І. М. (Ihor Butko)	42	Оборонов М. І. (Mykola Oboronov)	21
Вишнівський В. В. (Viktor Vyshnivskiy)	103	Олізаренко С. А. (Serhii Olizarenko)	126
Власенко Н. В. (Nataliia Vlasenko)	13	Олімпієва Ю. І. (Yuliya Olimpiyeva)	49
Войтенко С. С. (Serhii Voitenko)	38	Парфенюк Ю. Л. (Yurii Parfenyuk)	83
Волков А. Ф. (Andriy Volkov)	21	Пашаєв А. Б. (Adalat Pashayev)	148
Гавриленко С. Ю. (Svitlana Gavrylenko)	5	Плахотний О. В. (Oleksandr Plakhotnyi)	91
Гасанов А. Г. (Arif Hasanov)	148	Рабчан Я. (Jan Rabčan)	136
Гейко Г. В. (Hennadii Heiko)	5	Радченко В. О. (Viacheslav Radchenko)	126
Герасимов С. В. (Sergey Herasimov)	21	Раскін Л. Г. (Lev Raskin)	83
Гороховатський В. О. (Volodymyr Gorokhovatskyi) 13		Рибалка М. О. (Mykhailo Rybalka)	13
Гридасов І. О. (Illia Hridasov)	98	Сабодош А. Л. (Anastasiia Sabadosh)	58
Гулієв Б. В. (Bakhtiyar Guliyev)	152	Сабзієв Е. Н. (Elkhan Sabziev)	148
Давидов В. В. (Viacheslav Davydov)	136	Сакович Л. М. (Lev Sakovych)	120
Євсєєв С. П. (Serhii Yevseiev)	131	Седлачек П. (Peter Sedlaček)	103
Жилін В. А. (Volodymyr Zhilin)	58	Сіра О. В. (Oksana Sira)	83
Замрій І. В. (Iryna Zamrii)	49	Собчук В. В. (Valentyn Sobchuk)	49
Зінченко О. В. (Olha Zinchenko)	103	Сухомлин Л. В. (Larysa Sukhomlyn)	83
Коваленко А. А. (Andriy Kovalenko)	108, 159	Талібов А. М. (Aziz Talibov)	152
Коваленко С. П. (Serhii Kovalenko)	21	Таран О. В. (Olha Taran)	141
Кононов В. Б. (Volodymyr Kononov)	29	Ткачов А. М. (Andrii Tkachov)	131
Кононова О. А. (Olena Kononova)	29	Ткачов В. М. (Vitalii Tkachov)	159
Корольов Р. В. (Roman Korolyov)	131	Цао Вейлін (Cao Weiling)	136
Корсунов С. І. (Serhii Korsunov)	21	Чернева Г. П. (Galina Cherneva)	114
Костерна О. Ю. (Olena Kosterna)	91	Чжан Ліцян (Zhang Liqiang)	136
Кот В. В. (Vladimir Kot)	141	Чорнобай В. М. (Valentyn Chernobai)	141
Криховецький Г. Я. (Heorhii Krykhovetskyi)	120	Шевєрдіні І. В. (Illia Sheverdin)	5
Кучук Г. А. (Heorhii Kuchuk)	159	Шевченко С. О. (Sergey Shevchenko)	98
Кучук Н. Г. (Nina Kuchuk)	114	Шефер О. В. (Oleksandr Shefer)	114
Лаптев С. О. (Serhii Laptiev)	49	Ярошевич Р. О. (Roman Yaroshevych)	108
Левченко Л. О. (Larysa Levchenko)	34		

Наукове видання

Сучасні
інформаційні системиAdvanced
Information SystemsНауковий журнал
Том 5, № 2Відповідальний за випуск *С. Г. Семенов*Технічний редактор *Д. С. Гребенюк*Комп'ютерна верстка *Н. Г. Кучук*

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

Підписано до друку 31.05.2021 Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 20,75. Тираж 120 прим. Зам. 531-21

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. Широнінців, 79в, к. 137, тел. (057) 778-60-34
e-mail: bookfabrik@mail.ua

Problems of identification in information systems

УДК 004.732.056

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.01>

С. Ю. Гавриленко, І. В. Шевердін, Г. В. Гейко

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

ОЦІНКА ІНФОРМАТИВНОСТІ ТА ВИБІР ОЗНАК ПРИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАНУ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ

Анотація. Предметом статті є дослідження методів визначення інформативності ознак. Метою статті є підвищення якості класифікації стану комп'ютерної системи за рахунок вибору найбільш інформативних ознак. **Завдання:** дослідити методи вибору оптимальних інформаційних ознак для ідентифікації стану комп'ютерної системи на основі аналізу подій операційної системи *Windows*. Використовуваними методами є: методи машинного навчання, ансамблеві методи, методи вибору оптимальних інформаційних ознак. Отримано такі результати: виконано аналіз подій операційної системи *Windows*, досліджено методи вибору оптимальних інформаційних ознак: методи-обгортки (*Wrappers*), вбудовані методи (*Embedded*) і методи-фільтри (*Filters*). Виконано оцінку інформативності та вибір ознак при ідентифікації стану комп'ютерної системи. Для оцінки ефективності вибраних ознак було використано ансамблевий метод класифікації стану комп'ютерної системи на основі беггінгу та дерева рішень J48. Досліджено залежність точності класифікації стану комп'ютерної системи від обраних ознак та визначено набір атрибутів, які забезпечують максимальну точність класифікації стану комп'ютерної системи. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає у аналізі подій операційної системи *Windows*, оцінці їх інформативності та виборі ознак при ідентифікації стану комп'ютерної системи.

Ключові слова: комп'ютерна система; події операційної системи; інформативність ознак; дерева рішень; ансамблеві методи; беггінг.

Вступ

Сьогодні комп'ютерні системи використовуються практично у всіх галузях народного господарства. Експлуатація таких складних технічних систем усе більшою мірою стикається з проблемами забезпечення їх інформаційної та функціональної безпеки. Разом із тим, рівень розвитку засобів діагностування та ідентифікації 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].

Комп'ютерна система характеризується великим обсягом показників її функціонування. Для цього широко використовуються алгоритми машинного навчання, які збудовані таким чином, щоб безпосередньо працювати з величезними масивами інформації [2].

Разом із тим, на етапах постановки задачі машинного навчання і формування даних не завжди зрозуміло, які ознаки важливі для побудови оптимального алгоритму. Крім того, дані можуть містити багато надлишкової (шумової) інформації, що погіршує якість роботи алгоритму і уповільнює його роботу. Тому в більшості випадків перед вирішенням завдання класифікації, необхідно вибрати ті ознаки, які найбільш інформативні. Вибір важливих ознак також може допомогти розшифрувати механізми, що лежать в основі проблематики дослідження [3].

Постановка проблеми та огляд наукових публікацій. Ознаки (*feature*), що використовуються для побудови моделі, істотно впливають на якість результатів.

Неінформативні або слабо інформативні ознаки можуть значно знизити ефективність моделі.

Відбір ознак – це процес вибору ознак, що мають найбільш тісні взаємозв'язки з цільовою змінною.

Метою відбору ознак є:

- спрощення моделей;
- зменшення ймовірності перенавчання, тобто чим менше надлишкових даних, тим менше можливостей для моделі приймати рішення на основі «шуму»;
- підвищення точності, а саме чим менше суперечливих даних, тим вище точність;
- скорочення часу навчання, мається на увазі, чим менше даних, тим швидше навчається модель [4].

Передумовою застосування методики обрання ознак є те, що вихідні дані містять надлишкові або недоречні деякі ознаки, які можуть бути усунені без спричинення значної втрати інформації [5]. Завдання вибору оптимального набору ознак полягає в тому, щоб вибрати таку підмножину ознак з вихідного набору ознак, щоб **точність класифікатора, навченого на цій підмножині ознак, була максимальною** (по всій підмножині вихідної множини ознак).

Отже, нехай $I(T)$ – алгоритм навчання, $T(X)$ – навчальна вибірка, X – множина ознак навчальної вибірки $T(X)$, $X' \subseteq X$ – підмножина множини ознак, $T(X')$ – навчальна вибірка, побудована з використанням підмножини ознак X' , D – класифікатор: $D = I(T(X')), Q(D)$ – точність класифікатора. Тоді оптимальний набір ознак визначається так:

$$X_{opt} = \arg \max_{X' \subseteq X} Q(D), \quad D = I(T(X'))$$

Існує кілька підходів до вибору оптимальних інформаційних ознак. За поширеною класифікацією [6], існує три основні категорії методів вибору оптимальних інформаційних ознак: *методи-обгортки (Wrappers)*, *вбудовані методи (Embedded)* і *методи-фільтри (Filters)*.

Методи-обгортки є універсальними та якісними однак вимагають великих обчислювальних витрат і особливих зусиль по оцінці класифікатора і вибору найкращої стратегії пошуку [7]. *Вбудовані методи* виконують відбір ознак під час процедури навчання класифікатора, є швидкими. Однак, дані алгоритми не є універсальними [8]. *Методи-фільтри* є найбільш поширеними, мають найменшу обчислювальною складністю серед розглянутих підходів, а також масштабність і простоту застосування [9]. Вони засновані на деяких показниках, які не залежить від методу класифікації (наприклад, такі як кореляція ознак з цільовим вектором, критерії інформативності). Крім того, подібні методи показують досить хороші результати на практиці, вони не взаємодіють з алгоритмом навчання і вибирають оптимальну підмножину ознак, використовуючи тільки інформацію,

отриману з навчальної вибірки. Методи-фільтри виконуються на етапі **попередньої обробки**, до виконання алгоритму навчання. Вони можуть як незалежно оцінювати інформативність ознак для навчання, так і оцінювати підмножину ознак **в сукупності**. У першому випадку знадобиться визначити значення порогової константи (потрібної для того, щоб відкинути ті ознаки, інформативність яких для алгоритму навчання нижче значення порога). У другому випадку знадобиться проводити пошук по простору підмножин ознак [10].

Постановка завдання. Метою дослідження є підвищення якості класифікації стану комп'ютерної системи за рахунок вибору найбільш інформативних ознак.

Вибір підходу та критеріїв інформативності ознак для класифікації стану комп'ютерної системи

Аналіз подій операційної системи надає можливість оцінити стан комп'ютерної системи. Для збору подій операційної системи *Windows 10* було використано програмний додаток *ProcessMonitor* (рис. 1).

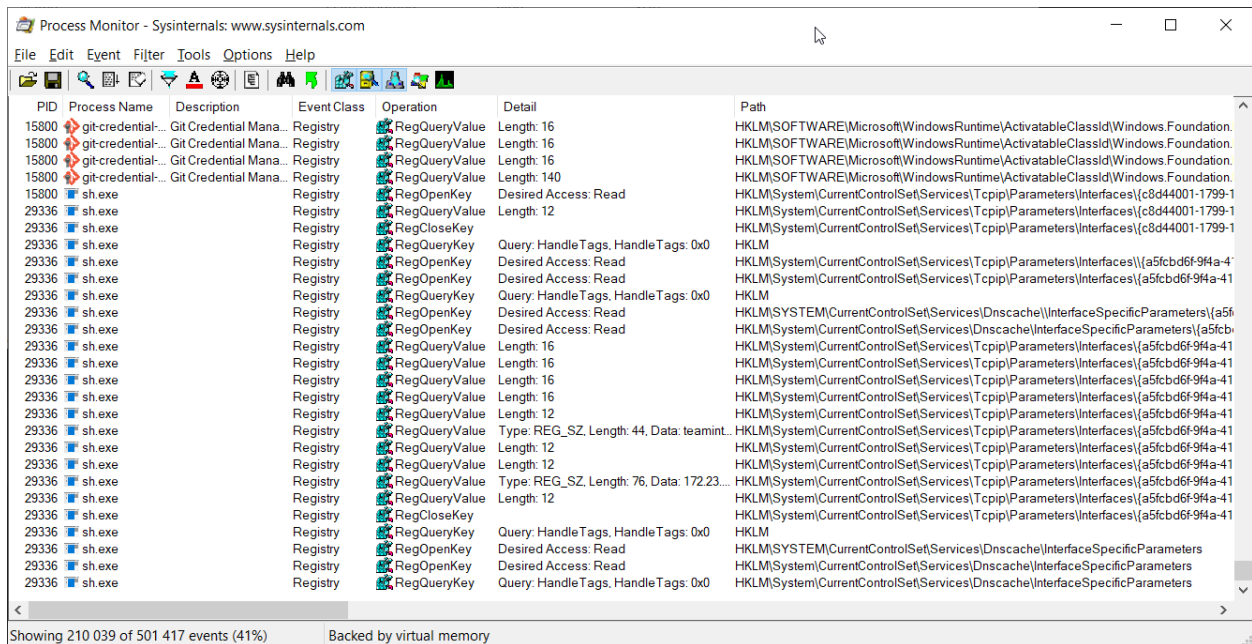


Рис. 1. Використання *ProcessMonitor* для збору подій (Fig. 1. Use *ProcessMonitor* to collect events)

Отримано, що КС характеризується великою кількістю подій та атрибутів. Основні труднощі класифікації її стану полягають в дуже великому розмірі простору ознак, яке носить назву прокляття розмірності. Це призводить до зниження ефективності оцінки її стану та потребує вилучення нерелевантних, або надлишкових ознак із заданого вектору атрибутів [11].

У якості підходу до вибору оптимальних інформаційних ознак використано метод-фільтрації на базі інформаційної ентропії, який має невелику обчислювальну складність, масштабність і простоту застосування.

Інформаційна ентропія – міра невизначеності деякої системи (в статистичній фізиці або теорії інформації), зокрема непередбачуваність появи будь-

якого символу первинного алфавіту. В останньому випадку при відсутності інформаційних втрат ентропія чисельно дорівнює кількості інформації на символ переданого повідомлення. Ентропія характеризує чистоту довільного набору. Це лежить в основі методів ранжування атрибутів. Міра ентропії розглядається як міра непередбачуваності системи [12].

Інформаційна ентропія визначається як:

$$H(Y) = - \sum_{y \in Y} p(y) \log_2(p(y)),$$

де $p(y)$ – гранична функція щільності ймовірності для випадкової величини Y .

Якщо спостережувані значення Y у навчальному наборі даних S розподілено відповідно до значень

другої ознаки X , а ентропія Y відносно частин індукованих ознакою X є меншою за ентропію ознаки Y до розділення, тоді існує зв'язок між ознаками Y і X . Інтуїтивно, ентропія відповідає ступеню хаосу в системі. Чим вище ентропія, тим менше впорядкована система і навпаки.

Тоді відносна ентропія Y/X знаходиться так:

$$H(Y|X) = - \sum_{x \in X} p(x) \sum_{y \in Y} p(y|x) \log_2(p(y|x)),$$

де $p(y/x)$ – умовна ймовірність у заданого x .

Враховуючи ентропію, як критерій домішки в навчальному наборі S , ми можемо визначити міру, що відображає додаткову інформацію про Y , яку надає X та представляє величину, на яку зменшується ентропія Y [13]. Тобто ми отримуємо інформацію (*InfoGainAttributeEval*) – існує кореляція між значеннями X і Y чи ні.

InfoGainAttributeEval (IG) визначає приріст інформації і знаходиться як:

$$IG = H(Y) - H(Y|X) = H(X) - H(X|Y) = H(Y) + H(X) - H(X, Y).$$

Приріст інформації (IG) для ознаки X визначається як різниця ентропії вибірок, отриманих без використання інформації ознаки X і з використанням цієї інформації.

Значення приросту інформації для ознаки говорить про різницю біт інформації, необхідних для того, щоб класифікувати об'єкт з використанням ознаки X і без її використання.

Чим більше параметр IG – тим сильніше кореляція між значеннями.

SymmetricalUncertAttributeEval (SU), а саме приріст інформації є симетричним показником – тобто кількість інформації, отриманої про Y після спостереження X , дорівнює кількості інформації, отриманої про X після спостереження Y . Симетрія є бажаною властивістю для міри взаємозв'язку ознак. На жаль, отримання інформації є упередженим на користь функцій із більшою кількістю значень. Симетрична невизначеність SU компенсує схильність інформаційного приросту IG до атрибутів з більшими значеннями і нормалізує його значення до діапазону $[0,1]$:

$$SU = 2.0 * \left[\frac{IG}{H(Y) + H(X)} \right].$$

GainRatioAttributeEval (GR) або коефіцієнт приросту інформації GR – це модифікація приросту інформації IG , яка зменшує її упередженість. Росс Квінлан запропонував зменшити упередження до багатозначних атрибутів, беручи до уваги кількість та розмір гілок при виборі атрибута:

$$GR = \frac{H(Y) - H(Y|X)}{H(X)}.$$

Коефіцієнт посилення долає проблему з приростом інформації, беручи до уваги кількість гілок, які виникли б до розбиття. Він коригує приріст інформації, беручи до уваги внутрішню інформацію X про розбиття. Таким чином, він вирішує недолік отримання

інформації, а саме отримання інформації, що застосовується до атрибутів, які можуть приймати велику кількість різних значень [15].

CorrelationAttributeEval (R), а саме коефіцієнт кореляції Пірсона між двома змінними дорівнює коваріації двох змінних, або сумі добутків відхилень, поділеній на добуток їх стандартних відхилень [16]. Нехай, є дві вибірки

$$x^m = (x_1, \dots, x_m), \quad y^m = (y_1, \dots, y_m).$$

Коефіцієнт кореляції Пірсона розраховують за формулою:

$$R = r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{s_x^2 s_y^2}},$$

де \bar{x}, \bar{y} – вибіркові середні, x^m, y^m, s_x^2, s_y^2 – вибіркові дисперсії [14].

Таким чином, у якості критеріїв інформативності ознак для класифікації стану комп'ютерної системи надалі досліджено:

- InfoGainAttributeEval* (приріст інформації),
- SymmetricalUncertAttributeEval* (оцінка симетричності приросту інформації),
- GainRatioAttributeEval* (коефіцієнт приросту інформації),
- CorrelationAttributeEval* (коефіцієнт кореляції Пірсона).

Вибір оптимального набору інформативних ознак та оцінка точності класифікації стану комп'ютерної системи

Результати дослідження (рис. 1) дозволили оцінити інформативність ознак на базі алгоритмів:

- CorrelationAttributeEval* (R),
- InfoGainAttributeEval* (IG),
- GainRatioAttributeEval* (GR),
- SymmetricalUncertAttributeEval* (SU).

Як видно із рис. 2 найбільш інформативними атрибутами є:

Process ID – ім'я процесу;
Operation – тип операції (наприклад: *RegOpenKey*, *CloseFile* and etc.);

Image Path – шлях до реєстру чи файлу, наприклад:

C:\Users\VirtualUser\Desktop\ZipFileSystemZipper.CS V або *HKCU\Software\Classes\CLSID\{56AD4C5D-B908-4F85-8FF1-7940C29B3BCF}\Instance*;

Result – результат виконання операції, наприклад: *SUCCESS*, *REPARSE*, *NAME NOT FOUND*, *BUFFER OVERFLOW* та ін.;

Event Class – тип події (реєстр, міжпроцесна комунікація, інтернет комунікація, виведення на носії, наприклад: *File System*, *Registry* та ін.);

Image Path – шлях до виконуваного файлу, який ініціював подію (наприклад: *C:\Windows\Explorer.EXE*);

Company – розробник програмного продукту та процесу, який ініціював цю подію, наприклад: *Microsoft Corporation*;

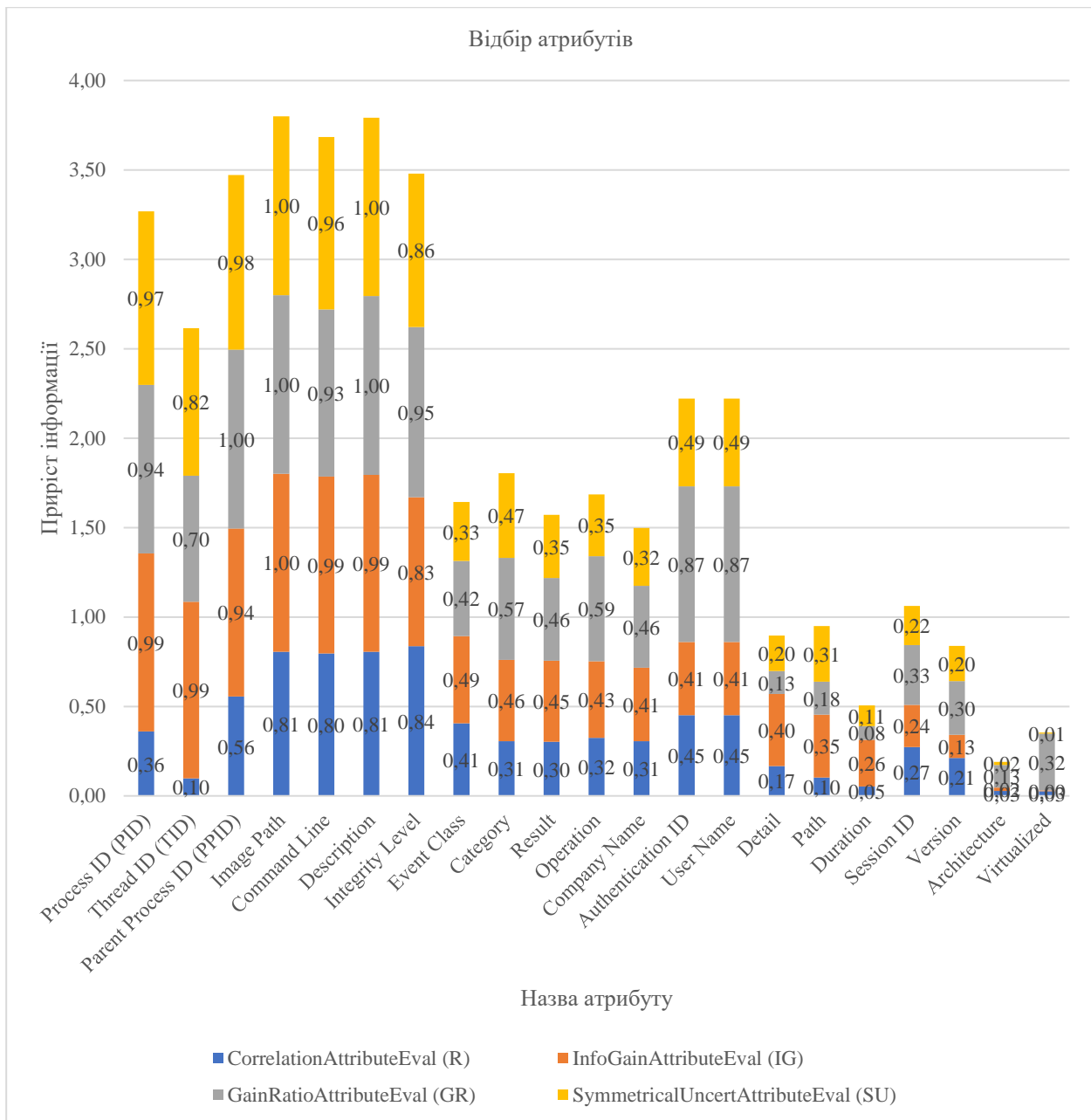


Рис. 2. Інформативність атрибутів (ознак) (Fig. 2. Informativeness of attributes (signs))

Description – опис програмного компоненту, наприклад: *Windows Explorer*;

User – ім'я користувача, який ініціалізував процес, наприклад: *DESKTOP-159T3OE\VirtualUser*;

Command Line – параметри командного рядка, наприклад: *C:\ Windows\System32\svchost.exe -k LocalServiceNetworkRestricted -p*;

Integrity – пріоритет і важливість виконуваної події, наприклад: *System, Medium, High, Low*;

Category – тип операції, наприклад: *read, write, read metadata, write metadata* та ін.;

Authentication ID – ID користувача з метою виявлення перейменування користувачів і груп, наприклад: *00000000:000270cb*;

Крім того, використовуючи параметри *Process ID, Process Name* і *Image Path* можна з точністю ідентифікувати ініціатора події, наприклад, конкретний виконуваний файл і процес [17].

Дослідження впливу вибору ознак на точність класифікації стану комп'ютерної системи

Подальші дослідження були пов'язані з оцінкою впливу вибору ознак на якість класифікації стану комп'ютерної системи.

У якості інструменту для аналізу стану КС та оцінки ансамблевих класифікаторів було обрано ПЗ “*Weka (Waikato Environment for Knowledge Analysis)*” [17], яке містить набір засобів віртуалізації і компонентів для інтелектуального аналізу даних та вирішення завдань прогнозування. У якості класифікатора використано ансамблевий метод класифікації стану комп'ютерної системи на основі алгоритму побудови дерева рішень *J48* [12].

Для експерименту було сформовано базовий набір атрибутів з найбільшими значеннями приросту

інформації, а саме більше 80% на базі результатів показників описаних раніше функцій R, GR, SU, IG.

Результати першого експерименту (рис. 3) надали можливість оцінити точність класифікації

Assurancy (A) при переборі значень атрибутів. При цьому менш інформативні атрибути додавалися до базових окремо один від одного і наділі визначалася точність класифікації стану КС.

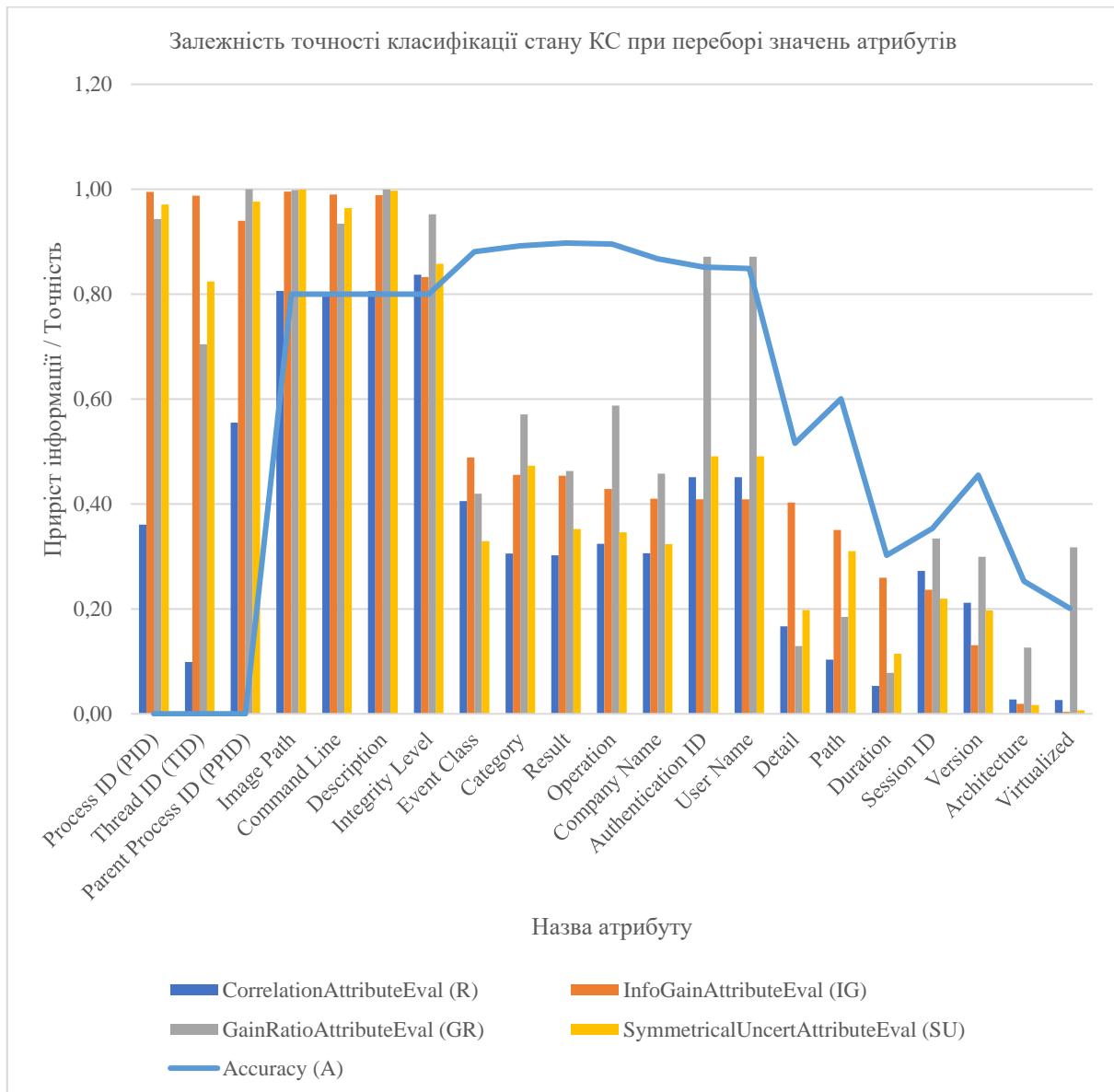


Рис. 3. Результати першого експерименту (Fig. 3. The results of the first experiment)

Як видно із рис. 3, точність класифікації при додаванні майже кожної ознаки зростала. Але починаючи з ознаки *Detail* точність класифікації стала зменшуватися.

Результати другого експерименту дозволили отримати акумулятивну точність класифікації Accumulated Assurancy (AA), де на кожному кроці додавали крок за кроком відібрані у першому експерименті ознаки та визначали точність класифікації залишаючи вибрані атрибути у наборі (рис. 4).

Аналіз інформаційного навантаження атрибутів *Process ID (PID)*, *Thread ID*, *Parent Process ID (PPID)*, є великими та потенційно вони можуть зменшити інформаційну ентропію, однак, вони не мають інформаційного навантаження, так як за цими значеннями атрибутів не можливо ідентифікувати стан

комп'ютерної системи. Тому вищенаведені атрибути вилучені із набору інформативних ознак для ідентифікації стану КС.

Таким чином, за результатами експериментів для ідентифікації стану КС було виділено наступні атрибути: *Process ID*, *Operation*, *Image Path*, *Result*, *Event Class*, *Image Path*, *Company*, *Description*, *User*, *Command Line*, *Integrity*, *Category*, *Authentication ID*. Сукупна точність при використанні обраних атрибутів має значення 98,32%.

Висновки

В даній роботі виділено події функціонування операційних системах сімейства *Windows*. Розглянуто підходи до вибору оптимальних інформаційних ознак для ідентифікації стану КС.

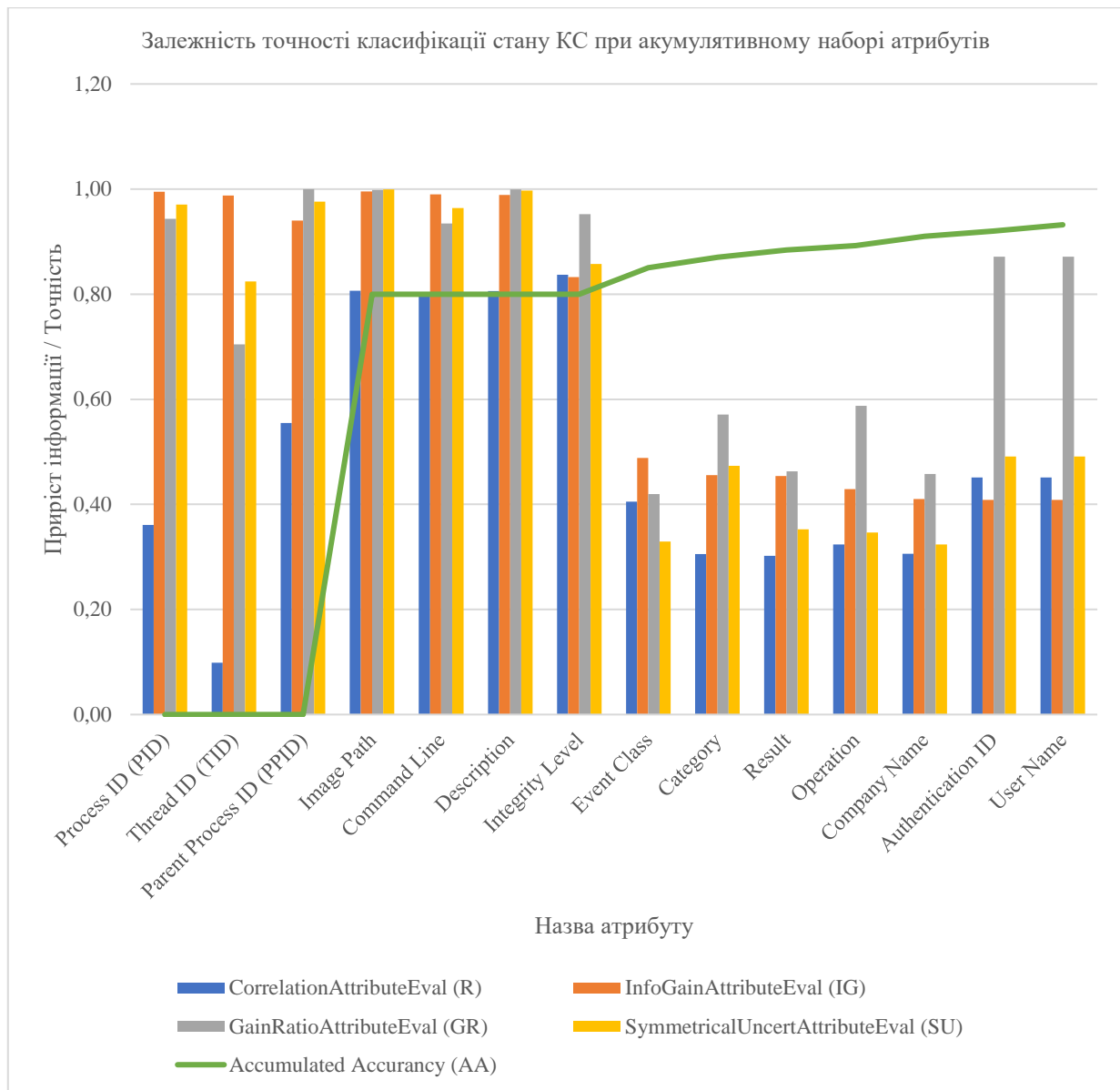


Рис. 4. Результати другого експерименту (Fig. 4. The results of the second experiment)

Досліджено методи вибору оптимальних інформаційних ознак:

методи-обгортки (Wrappers),
вбудовані методи (Embedded),
методи-фільтри (Filters).

Отримано, що найбільш поширеними є методи-фільтри, які мають найменшу обчислювальну складність, масштабованість, простоту застосування, не взаємодіють з алгоритмом навчання і вибирають оптимальну підмножину ознак, використовуючи тільки інформацію, отриману з навчальної вибірки.

Інформативність виділених подій функціонування операційних систем сімейства *Windows* була оцінена з використанням алгоритмів:

CorrelationAttributeEval (R),

InfoGainAttributeEval (IG),
GainRatioAttributeEval (GR),
SymmetricalUncertAttributeEval (SU).

Виконано дослідження впливу вибраних ознак на точність класифікації стану комп'ютерної системи.

У якості класифікатора використано ансамблевий метод класифікації стану комп'ютерної системи на основі алгоритму побудови дерева рішень *J48*. За результатами дослідження визначено набір атрибутів, які забезпечують максимальну точність класифікації стану комп'ютерної системи.

Подальші дослідження технологій ідентифікації стану комп'ютерної системи можуть бути виконані в системах протидії комп'ютерного вторгнення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Andreea Bendovschi. Cyber-Attacks – Trends, Patterns and Security Countermeasures. *7th International conference on financial criminology 2015*, 13-14 April 2015, Wadham College, Oxford, United Kingdom. P. 24-31.
2. Кульбак С. Теория информации и статистика. М.: Наука, 1967. 408 с.

3. R Kohavi, G. John. Wrappers for feature selection. *Artificial Intelligence*. 91(1-2): 1997. P. 273-324.
4. Isabelle Guyon, Andre Elisseeff. An introduction to variable and feature selection. *Journal of Machine Learning Research*. 3(2003). 2003. P.1157-1182.
5. Molina L.C., Belanche L., Ncbot A. Feature Selection Algorithms: A Survey And Experimental Evaluation. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Data Mining*, IEEE Computer Society: 2002. P. 306-313.
6. 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.
7. Phuong T. M., Lin Z., Altman R. B. Choosing SNPs using feature selection. Archived at the Wayback Machine Proceedings. *IEEE Computational Systems Bioinformatics Conference*, CSB. 2016. P. 301-309, DOI: <https://doi.org/10.1142/s0219720006001941>
8. Saghapour, E.; Kermani, S.; Sehhati, M. A novel feature ranking method for prediction of cancer stages using proteomics data. *PLoS ONE*, 2017, 12 (9). P. 24-29.
9. Hamon Julie. Optimisation combinatoire pour la sélection de variables en régression en grande dimension: Application en génétique animale (Thesis) (in French). Lille University of Science and Technology. 2013.
10. Yiming Yang, Jan O. Pedersen. A comparative study on feature selection in text categorization. *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Machine Learning (ICML' 97)* 1997. P. 412-420.
11. Гавриленко С.Ю., Швердін І.В. Ідентифікація стану комп'ютерної системи на основі ансамблевого методу класифікації. *Системи управління навігації та зв'язку*. Полтава: ПНУ, 2020. Вип. 3 (61). С. 75-79, DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.075>
12. Gavrylenko S., Sheverdin I. The ensemble method development of classification of the computer system state based on decisions trees. *Advanced Information Systems*. Vol. 4, No. 2. 2020. P. 5-10. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.3.01>
13. Tom Carter. An introduction to information theory and entropy. *Complex Systems Summer School*. Santa Fe, September 3, 2014. P. 34-39.
14. David J. C. MacKay. *Information Theory, Inference, and Learning Algorithms*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 629 p.
15. Narendra P., Fukunaga K. A Branch and Bound Algorithm for Feature Subset Selection. *IEEE Transactions on Computer*, 26(9): 1977. P. 917-922.
16. Lai, Chun Sing; Tao, Yingshan; Xu, Fangyuan; Ng, Wing W.Y.; Jia, Youwei; Yuan, Haoliang; Huang, Chao; Lai, Loi Lei; Xu, Zhao; Locatelli, Giorgio. A robust correlation analysis framework for imbalanced and dichotomous data with uncertainty. *Information Sciences*. 2019. P. 58-77.
17. Гавриленко С.Ю., Швердін І.В. Розробка методу оцінки стану комп'ютера на базі аналізу системних подій. *Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ, 2018. С. 108-114.

REFERENCES

1. Andreea, Bendovschi (2015), "Cyber-Attacks – Trends, Patterns and Security Countermeasures", *7th International conference on financial criminology*, 13-14 April 2015, Wadham College, Oxford, United Kingdom, pp. 24-31.
2. Kulbak, S. (1967), *Information Theory and Statistics*, Science, Moscow, 408 p.
3. Kohavi, R. and John, G. (1997), "Wrappers for feature selection", *Artificial Intelligence*, 91(1-2), pp. 273-324.
4. Isabelle, Guyon and Andre, Elisseeff (2003), "An introduction to variable and feature selection", *Journal of Machine Learning Research*, 3'(2003), pp. 1157-1182.
5. Molina, L.C., Belanche, L. and Ncbot, A. (2002), "Feature Selection Algorithms: A Survey And Experimental Evaluation", *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Data Mining*, IEEE Computer Society, pp. 306-313.
6. Stańczyk, U. (2015), "Feature Evaluation by Filter, Wrapper, and Embedded Approaches", Stańczyk U., Jain L. (eds), *Feature Selection for Data and Pattern Recognition*. Studies in Computational Intelligence, Springer, Berlin, Heidelberg, vol 584, 568 p.
7. Phuong, T.M., Lin, Z. and Altman, R.B. (2016), "Choosing SNPs using feature selection. Archived at the Wayback Machine Proceedings", *IEEE Computational Systems Bioinformatics Conference*, CSB, pp. 301-309, DOI: <https://doi.org/10.1142/s0219720006001941>
8. Saghapour, E.; Kermani, S. and Sehhati, M. (2017), "A novel feature ranking method for prediction of cancer stages using proteomics data", *Lille University of Science and Technology*, 12 (9), pp. 24-29.
9. Hamon, Julie (2013), "Optimisation combinatoire pour la sélection de variables en régression en grande dimension: Application en génétique animale" (Thesis) (in French), *Lille University of Science and Technology*.
10. Yiming, Yang and Jan O., Pedersen (1997), "A comparative study on feature selection in text categorization", *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Machine Learning (ICML' 97)*, pp. 412-420.
11. Gavrylenko, S.Yu. and Sheverdin, I.V. (2020), "Identification of the state of a computer system based on the ensemble method of classification", *Navigation and communication control systems*, Vol. 3 (61), PNTU, Poltava, pp. 75-79, DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.075>
12. Gavrylenko, S. and Sheverdin, I. (2020), "The ensemble method development of classification of the computer system state based on decisions trees", *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 2, pp. 5-10, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.3.01>
13. Tom, Carter (2014), "An introduction to information theory and entropy", *Complex Systems Summer School*, Santa Fe, September 3, pp. 34-39.
14. David J. C., MacKay (2003), *Information Theory, Inference, and Learning Algorithms*, Cambridge: Cambridge University Press, 629 p.
15. Narendra, P. and Fukunaga, K. (1977), "A Branch and Bound Algorithm for Feature Subset Selection", *IEEE Transactions on Computer*, 26(9), pp. 917-922.

16. Lai, Chun Sing; Tao, Yingshan; Xu, Fangyuan; Ng, Wing W.Y.; Jia, Youwei; Yuan, Haoliang; Huang, Chao; Lai, Loi Lei; Xu, Zhao; Locatelli, Giorgio (2019), "A robust correlation analysis framework for imbalanced and dichotomous data with uncertainty", *Information Sciences*, pp. 58-77.
17. Gavrylenko, S.Y. and Sheverdin, I.V. (2018), "Development of a method for assessing the state of the computer based on the analysis of system events", *Methods and devices of quality control*, Ivano-Frankivsk, pp. 108-114.

Received (Надійшла) 17.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.04.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Гавриленко Світлана Юрївна – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Svitlana Gavrylenko – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: gavrylenko08@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6919-0055>.

Шевєрді́н Ілля Валентинович – аспірант, кафедра обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Illia Sheverdin – PhD Student of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: illia.sheverdin@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7881-0658>.

Гейко Геннадій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Hennadii Heiko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: gennady1752@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6958-8306>.

**Оценка информативности и выбор признаков
при идентификации состояния компьютерной системы**

С. Ю. Гавриленко, И. В. Шевєрді́н, Г. В. Гейко

Аннотация. Предметом статьи является исследование методов определения информативности признаков. **Целью статьи** является повышение качества классификации состояния компьютерной системы за счет выбора наиболее информативных признаков. **Задача:** исследовать методы выбора оптимальных информационных признаков для идентификации состояния компьютерной системы на основе анализа событий операционной системы Windows. **Используемыми методами** являются: методы машинного обучения, ансамблевые методы, методы выбора оптимальных информационных признаков. Получены **следующие результаты:** выполнен анализ событий операционной системы Windows, исследованы методы выбора оптимальных информационных признаков: методы-обертки (Wrappers), встроенные методы (Embedded) и методы-фильтры (Filters). Выполнена оценка информативности и выбор признаков при идентификации состояния компьютерной системы. Для оценки эффективности выбранных признаков были использованы ансамблевый метод классификации состояния компьютерной системы на основе беггингу и дерева решений J48. Исследована зависимость точности классификации состояния компьютерной системы от выбранных признаков и определен набор атрибутов, которые обеспечивают максимальную точность классификации состояния компьютерной системы. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов заключается в анализе событий операционной системы Windows, оценке их информативности и выбора признаков при идентификации состояния компьютерной системы.

Ключевые слова: компьютерная система; события операционной системы; информативность признаков; деревья решений; ансамблевые методы; беггинг.

**Informativity assessment and attributes selection
in a computer system state identification**

Svitlana Gavrylenko, Illia Sheverdin, Hennadii Heiko

Abstract. The subject of the article is a study of methods of determining the informativeness of attributes. **The aim of the article** is improvement of the classification quality of a computer system state by selecting the most informative features. **Objective:** To explore methods for selecting optimal information features to identify a computer system state based on an analysis of the Windows operating system events. **The methods used are:** machine learning methods, ensemble methods, methods of selecting the optimal information features. **The following results were obtained:** analysis of the Windows operating system events was performed, methods of selection the optimal information features were investigated: wrapper methods (Wrappers), embedded methods (Embedded) and filter methods (Filters). The informativeness assessment and selection features were performed for identifying a computer system state. An ensemble method for classifying a computer system state based on a bagging and J48 decision tree was developed to evaluate the effectiveness of selected features. The dependency of the classification accuracy of a computer system state on the selected features was investigated, and the attributes set that provides the maximum classification accuracy of a computer system state was determined. **Conclusions.** The scientific novelty of the results is in the analysis of the Windows operating system events, assessment of their informativeness and selection of features in the identification a computer system state.

Keywords: computer system; operating system events, informative features, decision trees; ensemble methods; bagging.

В. О. Гороховатський¹, Н. В. Власенко², М. О. Рибалка¹

¹ Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

² Харківський національний економічний університет імені С. Кузнеця, Харків, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ ХЕШУВАННЯ ДАНИХ ДЛЯ ПРИСКОРЕННЯ КЛАСИФІКАЦІЙНИХ РІШЕНЬ У СТРУКТУРНИХ МЕТОДАХ РОЗПІЗНАВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Анотація. Предметом досліджень є методи класифікації зображень за множиною дескрипторів ключових точок. Метою є підвищення продуктивності методів класифікації, зокрема, прискорення часових показників класифікації шляхом впровадження засобів хешування для подання еталонних даних. **Методи, що застосовуються:** детектор та дескриптори ORB, засоби хешування даних, методи пошуку в масивах даних, апарат визначення релевантності векторів на основі метрик, програмне моделювання. **Отримані результати:** розроблено ефективний метод класифікації зображень на основі впровадження швидкісного пошуку із використанням хеш-структур, що прискорює обчислення в десятки разів; час класифікації для розглянутих експериментальних описів лінійно зростає зі зменшенням числа хеш-кошиків; вибір порогу для значення мінімуму метрики при встановленні класу для дескрипторів об'єкту суттєво впливає на точність класифікації; вибір такого порогу може бути оптимізовано для фіксованих баз зразків; експериментально досягнута точність класифікації вказує на працездатність та результативність запропонованого методу на підґрунті хешування даних. **Практична значущість роботи** – побудова моделей класифікації у просторі хеш-подання даних, підтвердження працездатності запропонованих модифікацій класифікаторів на прикладах зображень, розроблення прикладних програмних моделей для впровадження запропонованих методів класифікації у системах комп'ютерного зору.

Ключові слова: комп'ютерний зір; структурні методи класифікації зображень; дескриптор ORB; хешування, лінійний пошук, хеш-кошик, швидкодія оброблення, точність класифікації.

Вступ

Сучасні структурні методи класифікації зображень, що застосовуються у системах комп'ютерного зору, ґрунтуються на даних про образи візуальних об'єктів у вигляді множини дескрипторів ключових точок (КТ) [1-3]. Дескриптор КТ – це, як правило, вектор розміром 64...512 бінарних компонентів. Побудова класифікатора заснована на визначенні ступеня релевантності типу множини-множина між описами розпізнаваного об'єкту та еталону та оптимізації релевантності на множині еталонів.

В загальному випадку клас візуального об'єкта при цьому визначається як нескінченна множина зображень об'єкту з урахуванням його допустимих геометричних перетворень: зсувів, поворотів, масштабування в межах поля зору комп'ютерної системи [1]. Представником класу для класифікатора є еталонне зображення, за яким і визначаємо образ (множину ознак) еталона. Набір обраних користувачем еталонних образів створює скінченну базу зразків. У рамках даних бази еталонів здійснюється класифікація об'єктів, що полягає у віднесенні вхідного зображення до одного із еталонних класів або у відмові від класифікації у разі недостатнього для прийняття рішення рівня релевантності з еталонами [1-4].

При несуттєвому рівні впливу фону та завад на аналізованому зображенні отримав застосування класифікаційний підхід, де на підставі значень ком-плектної множини дескрипторів опису формується система інтегрованих характеристик [1]. Зрозуміло, що впровадження інтегрованої системи ознак суттєво скорочує обчислювальні витрати на класифікацію за рахунок принципу узагальнення інформації. Але більш універсальним у аспекті завадостійкості все-

таки вважається по-елементний аналіз компонентів опису, що на основі формування статистичних характеристик цілісного образу дає можливість у процесі класифікації частково знизити вплив перешкод [2].

Для способу по-елементного аналізу традиційний підхід структурної класифікації зводиться до пошуку для кожного дескриптора із опису розпізнаваного об'єкта деякої підмножини релевантних йому у комплектній множині дескрипторів бази еталонів та підрахунку числа дескрипторів об'єкту, віднесених відповідно до кожного із класів. Зважаючи на те, що число дескрипторів у описі кожного еталону досягає 300...500, а класів може бути десятки і навіть сотні, такий підхід потребує досить громіздких обчислень [1, 3, 5].

Впровадження засобів хешування даних здатне суттєво скоротити часові затрати у процесі практичної реалізації процедур пошуку та класифікації. При хешуванні дані бази еталонів попередньо розкладають на групи подібних за деякою ознакою елементів, що значно (у тисячі разів) прискорює процес оброблення за рахунок відповідного зростання вимог до об'ємів пам'яті [3, 6, 7]. Хешування реалізує перспективну ідею зниження розмірності шляхом попередньої побудови для еталонної множини деякої індексованої структури даних, що загалом сприяє спрощенню оброблення та знижує обчислювальні затрати на класифікацію.

У роботах [8, 9] розвинуто наближені методи швидкого метричного пошуку за зразком на підставі створення індексованих структур даних на множині ієрархічних ознак зображень, для яких здійснюється сегментація значень функції яскравості. Спеціалізована індексована структура на підґрунті принципу

кластеризації об'ємних масивів багатовимірних даних впроваджена також у розробках професійних систем пошуку [10], де задля покращення продуктивності пошуку компонентів візуальних даних застосована багатоетапна схема кластеризації з моделлю наближеного пошуку релевантних елементів всередині кластеру. Створення кластерних структур даних як сучасний підхід інтелектуального аналізу дає можливість краще адаптуватися до змісту еталонної інформації, що застосовано нами при визначенні релевантності візуальних об'єктів у технологіях «мішок слів» [1, 11, 16]. Алгоритмічні та програмно-апаратні засоби швидкого пошуку у об'ємних сховищах даних (наприклад, у веб-застосунках) успішно розвиваються і знаходять впровадження у сучасних прикладних пошукових системах [5, 10, 12, 14].

Зрозуміло, що для систем комп'ютерного зору ключовим критерієм при впровадженні засобів швидкого пошуку є все-таки гарантоване забезпечення достатніх показників результативності класифікації.

Мета роботи – розвинення та підвищення продуктивності методів класифікації зображень шляхом впровадження індексованих хеш-структур на множині дескрипторів бази еталонних образів.

Завдання дослідження полягають у побудові хеш-структур даних на множині дескрипторів бази еталонів, впровадження цих структур у процес класифікації, вивчення результативності та часових показників розроблених модифікацій класифікаторів.

Двоетапна класифікація

Розглянемо простір B^n багатовимірних бінарних векторів розмірністю n , у якому будемо конструювати образи розпізнаваного об'єкту і еталонів. Зафіксуємо деяку мультимножину векторів $E_i \subseteq B^n$ як опис еталону $E_i = \{e_v(i)\}_{v=1}^s$ у просторі множин дескрипторів КТ, $s = \text{card } E_i$ – число дескрипторів у множині [1]. Окремі ознаки – це вектори $e_k \in B^n$, скінченна множина яких створює опис об'єкту.

Класифікація передбачає наявність деякої бази E описів еталонних зображень розмірністю $N : E = \{E_1, E_2, \dots, E_N\}$. Кожний еталонний опис E_i репрезентує окремий клас, представлений скінченною множиною дескрипторів КТ. Тепер розглянемо довільний опис $Z \subset B^n$, $Z = \{z_w\}_{w=1}^s$ розпізнаваного об'єкту. Поставимо задачу побудови класифікатора K як відображення $K : Z \rightarrow [1, 2, \dots, N]$ на основі попереднього конструювання деякої індексованої структури на множині E .

Класифікацію K представимо у вигляді двоетапного процесу $K = K_2 K_1$, де на першому етапі $K_1 : B^n \rightarrow [1, 2, \dots, N]$ здійснюємо визначення класу d_w для кожного дескриптора $z_w \in Z$, а на другому етапі $K_2 : D \rightarrow [1, 2, \dots, N]$ із множини $D = \{d_w\}_{w=1}^s$ отриманих локальних рішень першого

етапу формуємо результуючий висновок про клас об'єкту Z . Такий принцип оброблення узагальнює множину рішень однорідних локальних класифікаторів [2, 14]. Фактично K_1 тут можна розглядати як багатозначну характеристичну функцію для визначення еталонного класу E_i щодо окремого дескриптора із опису розпізнаваного об'єкта.

Етапи K_1 , K_2 можна побудувати і в інших варіантах, наприклад, шляхом створення на етапі K_1 деякого ймовірнісного розподілу за класами еталонів, включаючи процедури логічного оброблення таких розподілів [2].

Конструктивно реалізація K спирається на апріорні дані наявної бази E , так як належність усіх $e_v(i)$ до відповідного образу E_i всередині бази уже відома на початку класифікації.

Якщо класифікацію K_1 здійснювати традиційно методом лінійного пошуку (повний перебір) шляхом послідовного аналізу кожного елемента набору E , то застосовують конкурентне правило [2, 13-15]

$$d_w = \arg \min_{i,v} \rho(z_w, e_v(i)), \quad (1)$$

де d_w – номер еталону E_i , до якого буде віднесено дескриптор z_w об'єкту, $d_w \in \{1, \dots, N\}$, $\rho(z_w, e_v(i))$ – метрика у векторному просторі.

Важливим задля результативної класифікації є впровадження логічного аналізу значення мінімуму, що досягнуто при здійсненні (1) [16]. Значення d_w визначається тільки тоді, якщо отриманий мінімум відстані не перевищує заданий поріг δ_ρ : $\rho_{\min} \leq \delta_\rho$. У протилежному випадку клас d_w не визначається, тобто дескриптор вважається хибним.

Загалом необхідну кількість Q обчислень значень метрики в (1) у повній базі еталонів лінійним пошуком можна оцінити значенням параметру $Q = N \cdot s^2$, вважаючи обсяги описів еталонів та об'єкта рівноцінними. Для векторів простору B^n в (1) може бути застосована проста в обчислювальному сенсі метрика Хемінга, що підраховує число не співпадаючих бітів для векторів [1].

Етап класифікації K_2 зводиться до того, що на кожному кроці аналізу опису Z по правилу (1) за значенням d_w інкрементується число r_i голосів елементів, віднесених до i -го класу

$$\begin{cases} r_i + 1, & d_w = i; \\ r_i, & d_w \neq i, \end{cases} \quad (2)$$

а клас i_0 образу Z об'єкта визначаємо за максимумом числа голосів:

$$i_0 = \arg \max_{i=1, \dots, N} r_i. \quad (3)$$

Значення $\{r_i\}_{i=1}^N$ відображають гістограму класів за числом голосів елементів із Z . Вирази (2),

(3) конкретизують етап K_2 , що полягає у обробленні голосів для компонентів опису Z . Розглянута двоетапна процедура класифікації базується на основоположному принципі інтелектуального аналізу даних, що полягає у підрахунку числа позитивних рішень (підтримка, рейтинг зустрічальності) на аналізованій множині даних [14, 17].

Розглянуті варіанти побудови класифікатора природно можна трактувати в рамках теорії ансамблевих моделей [2,14], де за рахунок створення та агрегування відгуків компонентних класифікаторів (локальних рішень) синтезується «сильний» класифікатор із гарантовано вищою результативністю прийняття рішень. Це відповідає моделі бустінгу [14, 17].

Ключовою обчислювальною проблемою при побудові класифікатора для об'ємних баз даних є реалізація пошуку (1), що фактично є традиційним підходом ближнього сусіда. Зосередимося на її вирішенні шляхом застосування у двоетапній процедурі класифікації спеціалізованої структури даних, що спрямована на зменшення обсягу обчислень Q .

Індексована структура даних для організації швидкого пошуку

На етапі попереднього оброблення створимо у еталонній множині E образів спеціалізовану структуру задля забезпечення швидкісної результативної класифікації.

Здійснимо розбиття T на множині E дескрипторів бази зображень, отримуємо множину із M непересічних груп $T_k(E)$:

$$E = T(E) = \bigcup_{k=1}^M T_k(E),$$

$$T_k(E) \cap T_j(E) = \emptyset. \quad (4)$$

Будемо мати на увазі два основних та найбільш поширених способи розбиття: хешування та кластеризацію [3, 16]. Загалом впровадження хешування пов'язують із точними засобами оброблення, а кластеризацію – із наближеними способами самонавчання для вирішення прикладних задач [4, 9, 12]. Трансформація (4) здійснює попередню класифікацію і повністю зберігає усю сукупність аналізованих даних, яка тепер розподіляється між групами $T_k(E)$. У результаті перетворення (4) кожний дескриптор $e_v \in E$ бази еталонів отримує параметр k номеру групи (кошика).

$$\text{Зважаючи на уже існуюче розбиття } E = \bigcup_{i=1}^N E_i$$

даних на окремі еталонні образи, визначимо величину

$$t_{i,k} = \text{card}\{e_v \mid e_v \in E_i \ \& \ e_v \in T_k\} \quad (5)$$

як число дескрипторів i -го класу, що потрапили до кошика T_k . На підставі $t_{i,k}$ маємо вагову кількісну характеристику $b_i(T_k)$ для кожного кластеру

$$b_i(T_k) = \frac{t_{i,k}}{\text{card} T_k}. \quad (6)$$

Вираз (6) визначає статистичний розподіл елементів кожного сегменту даних за класами еталонів у вигляді вагових коефіцієнтів класів, причому $\sum_{i=1}^N b_i = 1$. Розподіл b є спільною характеристикою усіх елементів сегменту даних, отриману за результатами аналізу (навчання) для бази E . На етапі навчання ефективним для підвищення результативності класифікації може бути запровадження логічного оброблення вектору b задля спрощення аналізу та підсилення впливу вагових коефіцієнтів b_i для найбільш значущих класів у кошику [1, 2].

Конкретно для хешування ознакою окремого кошику (кластеру) даних виступає значення хеш-функції.

Ще одним важливим параметром, що впливає на швидкодію пошуку, є число кошиків M . Чим менше число кошиків, тим вища швидкодія переходу до кошику. Чим більше число кошиків, тим менше об'єм даних для аналізу всередині кошиків. Граничними ситуаціями є один кошик ($M = 1$) та повна відсутність хешування ($M = N \cdot s$), що відповідають лінійному пошуку.

За думкою дослідників можна формулювати задачу оптимізації числа M кошиків, де критерієм виступає число Q обчислень метрики для компонентів опису [9, 10].

Якщо в одному кошику в середньому число елементів є $\frac{N \cdot s}{M}$, то кількість обчислень (1) всередині індексної структури з використанням значень хеш-коду пропорційна $Q_1 = s \cdot M + \frac{N \cdot s}{M}$, що значно менше, ніж $Q_2 = N \cdot s^2$ для традиційного лінійного пошуку. Для конкретних значень $s = 500$, $N = 10$, $M = 10$ вираш $\beta = Q_1/Q_2$ складає приблизно 450 разів і зростає зі збільшенням обсягів N, s даних.

Задля подальшого прискорення процедури оброблення можна застосувати додаткове упорядкування отриманої структури даних, впровадивши, наприклад, сортування даних всередині кошиків T_k за деяким ключем $g(e_v)$ [1].

Метод оброблення даних з використанням хешування [3, 6], який фактично здійснює попередню класифікацію на окремі кошики та має свої особливості. Число кошиків для цього методу, як правило, фіксоване і пов'язане із діапазоном значень хеш-ключа $u(e_v)$ для хешування, яке задає користувач та вважають заданим.

Ключ – це, як правило, ціле число, що приймає множину фіксованих значень $u(e_v) \in U_0$, $U_0 = \{u_k\}_{k=1}^L$ – множина значень хеш-функції [6]. Для векторів із B^n таким ключем може бути, на-

приклад, число одиничних бітів у складі дескриптору, число вибраних комбінацій бітів довільної довжини та ін. Взагалі ознаку $u(e_v)$ для хешування можна корисно адаптувати до значень описів наявної бази еталонів.

Із впровадженням хешування розбиваємо множину даних E на непересічні групи $U_k(E)$ (ланки, кошики, полиці) числом L з рівнозначним значенням хеш-ключа $u(e_v) = u_k$

$$E = U(E) = \bigcup_{k=1}^L U_k(E),$$

$$U_i(E) \cap U_j(E) = \emptyset,$$

$$U_k(E) = \{e_v \in E \mid u(e_v) \in u_k\}. \quad (7)$$

Класифікація на основі хеш-структури

Застосовуємо детектор КТ до зображення розпізнаваного об'єкту, формуємо опис $Z = \{z_w\}_{w=1}^s$ об'єкту як множину дескрипторів. Побудуємо класифікатор з використанням швидкісного пошуку у базі E на підставі створеної структури.

Спосіб із впровадженням хешування включає такі дії.

1. Для дескриптора z_w вхідного образу обчислюємо величину хеш-ключа $u_w = u(z_w)$, $u_w \in U_0$ як значення хеш-функції для аргументу z_w .

2. Переходимо до корзини хешу зі значенням u_w , а далі реалізуємо один із способів пошуку в межах кошика: лінійний, найближчих сусідів, за розподілами даних чи інші. Лінійний пошук та визначення найближчих сусідів в межах ланки реалізують точну процедуру. Використання оцінок розподілів за класами для окремих ланок хешу сприяє прискоренню обчислень і відповідає наближеному оціночному способу на підставі навчання.

3. За результатом пошуку на етапі 2 для елемента z_w визначаємо клас d_w .

4. На підставі аналізу усієї множини Z дескрипторів об'єкту накопичуємо лінійку $\{r_i\}_{i=1}^N$ значень голосів за кожний з еталонних класів.

5. За виразом (3) класифікуємо об'єкт до класу, що набрав найбільшу кількість голосів.

Як бачимо, запропонований продуктивний за швидкістю спосіб класифікації на підґрунті впровадження хешування може реалізувати як точний, так і наближений види пошуку. Параметрами є число груп (кошиків хешу), побудованих для компонентів даних в індексованій структурі. Цим параметром можна керувати, виходячи із наповненості кошиків для конкретних даних.

Розподіли за класами еталонів для створених груп даних теж несуть важливу інформацію для класифікації, на підставі чого можна видалити із аналізу окремі кошики (якщо класи всередині них розподілені суто рівномірно), або за значеннями розподілу приймати однозначне класифікаційне

рішення (якщо спостерігаються суттєві переваги для окремих класів).

За результатами попереднього оброблення еталонної інформації (навчальна, контрольна вибірка) можна оцінити результативність застосування класифікатора. Точність $prec$ класифікації можна оцінити відношенням гуртового числа ТР дескрипторів бази еталонів, для яких правильно визначено клас, до загального їх числа у відповідності до моделі [2, 14]

$$prec = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (8)$$

де TP – число дескрипторів з правильно визначеним класом, FP – число дескрипторів з неправильно визначеним класом. Найвища точність відповідає значенню $prec = 1$.

Результати комп'ютерного моделювання

Моделювання виконано у середовищі PyCharm 2018 із використанням засобів бібліотеки Open CV та мови програмування Python [18-21]. Для визначення дескрипторів КТ застосовано детектор ключових точок ORB [18, 20] з дескриптором розмірністю $n=256$. Розроблені моделі класифікатора вжито на прикладі зображень порід собак (німецька вівчарка, хаскі, сербернар), розмір зображень масштабовано до 500x500 пікселів. Ілюстрація класів еталонних зображень та сформовані координати КТ показані на рис. 1. Кількість обчислених дескрипторів у описі кожного із еталонів складає $s=500$.

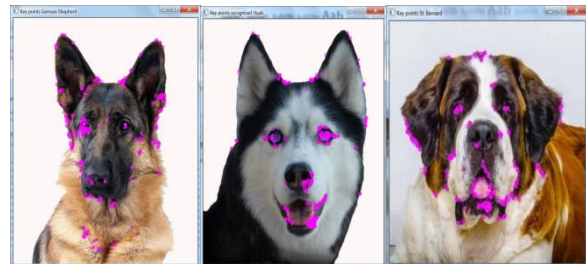


Рис. 1. Еталонні зображення порід собак з координатами ключових точок
(Fig. 1. Reference images of dog breeds with the coordinates of key points)

Як бачимо, візуально ці зображення за зовнішніми ознаками досить близькі. Якщо у якості хеш-функції $u(z_w)$ взяти число одиничних бітів у векторі розмірністю 256, то кількість вибраних кошиків змінюється у межах від 1 до 257, тобто найбільша множина U_0 містить значення 0, 1, 2, ..., 256. Всередині кошиків у експерименті для спрощення застосовано традиційний лінійний пошук. Зважаючи на бінарний вид аналізованих даних, для зіставлення векторів застосовано метрику Хемінга.

З метою зіставлення характеристик швидкодії програмно змодельований метод лінійного пошуку на усій множині еталонних даних (1500 дескрипторів) без застосування хешування. Для еталонних зображень із застосуванням хешування на 256 кошиків та без хешування отримано максимально

точний результат: усі 500 дескрипторів віднесені до свого еталону. При цьому час оброблення без хешування склав приблизно 40 сек, а із хешуванням – лише 0,6 сек. Як бачимо, вигреш у часі обчислень для запропонованого підходу (при заданому числі 3 еталонів та $s=500$) складає більше 65 разів у порівнянні із традиційним. При цьому ясно, що вигреш у часі обчислень збільшується при зростанні числа еталонів та дескрипторів у описах Аналогічні точні результати класифікації еталонів отримано і для іншої кількості кошиків.

Вивчення отриманої множини дескрипторів за визначеною хеш-функцією для зображень рис. 1 показало, що в межах її значень від 0 до 92 та від 217 до 255 взагалі немає жодного дескриптора. Розподіл дескрипторів для досліджуваної бази еталонів на 3 кошки, рівноцінні за діапазоном значень хеш-функції, показано у табл. 1.

Таблиця 1 – Кількісний розподіл дескрипторів бази

Значення хеш-функції	Число дескрипторів
93 - 133	375
134 - 174	1004
175 - 216	121

Експериментальний результат табл. 1 відкриває перспективу подальшого скорочення об'єму обчислень, так як допускає виключення із аналізу суттєвої не використовуваної частини від загального числа кошиків. У той же час ця можливість сприяє забезпеченню завадостійкості роботи методу з хешуванням.

Хешування відносять до точних методів трансформації даних. Природно зрозуміло, що похибка класифікації із впровадженням хешування може виникнути із-за того, що всередині корзини згрупованих даних можуть зустрітися рівноцінні дескриптори різних класів.

Важливим для забезпечення результативної класифікації представляється вплив параметра порогу δ_p для значення мінімальної відстані при прийнятті рішення про клас дескриптора об'єкта за правилом (1). Діапазон значень для вибраної метрики складає $\delta_p \in [0, \dots, 256]$.

Наше моделювання для навчальної вибірки показало, що зі зменшенням порогу відсікається більша частина «чужих» дескрипторів (інших еталонів), але при цьому одночасно губиться і значна частина «своїх». Зі зростанням порогу δ_p спостерігається збільшення числа «своїх» з одночасним збільшенням числа «чужих». Як бачимо, виникає конкурентна ситуація, розв'язання якої може бути досягнуто шляхом оптимізації значення порога конкретно для наявної бази еталонів, а критерієм виступає точність (8) класифікації, результативним фактом при цьому є переважаюче число правильно класифікованих дескрипторів для свого класу. Оптимізація універсально може бути реалізована експериментальним шляхом для прикладної бази зображень. У нашому дослідженні найкращі результати досягнуто при значенні $\delta_p=100$.

Найбільш критично вибір порога впливає на результат класифікації при геометричних перетвореннях вхідного зображення. Експерименти з дією перетворення повороту (найбільшим чином викривляє зображення, рис. 2) для вхідних еталонних зображень показали, що при низьких порогах втрачається статистично значиме число правильно класифікованих дескрипторів, що потребує збільшувати значення порогу.

У той же час навіть при невеликому значенні порогу $\delta_p = 25$ вхідні зображення еталонів (навчальна вибірка) класифікуються вірно, незважаючи на суттєве зниження числа виявлених «своїх» даних (від 330 до 129 для різних еталонів).

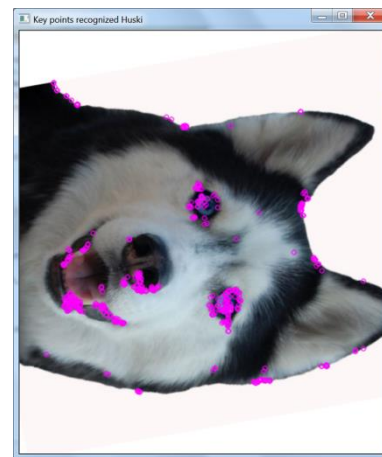


Рис. 2. Зображення з координатами ключових точок при повороті (Fig. 2. Images with coordinates of key points when turning)

Таблиця 2 – Залежність часу класифікації від числа кошиків

Число кошиків	257	128	64	32	16	8	1
Час класифікації	0,6	1,3	2,5	4,9	9,5	18,4	40

Дослідимо тепер детальніше залежність часу класифікації (в сек) від числа кошиків. Експериментальні дані поміщені в табл. 2, число кошиків 1 відповідає варіанту без хешування.

Як бачимо, експериментальний час класифікації для розглянутих описів лінійно зростає зі зменшенням числа кошиків при застосуванні хешування.

Таким чином, при необхідності прийняття найбільш швидкісних рішень треба вибирати максимально можливе число кошиків. Отримана залежність властива виключно для аналізованих еталонних зображень.

У загальному плані необхідно додатково вивчати цю залежність для досліджуваної бази даних. Найбільш несприятливі для обсягів часу є ситуації, коли, наприклад, значна кількість дескрипторів різних класів зосереджуються у спільній корзині. Для вибраної нами хеш-функції стосовно досліджу-

ваних описів найкращим вибором виглядає число кошиків 257.

Час класифікації спадає зі збільшенням числа кошиків через те, що зменшуються кількості дескрипторів всередині кошиків, а після знаходження кошика обчислюється відстань Хемінга уже для меншої кількості дескрипторів. Пошук кошика за значенням хеш-функції відбувається значно швидше у порівнянні з обчисленням метрики для множини дескрипторів всередині кошиків.

Задля оцінювання ступеня відмінностей між описами еталонних даних обчислено манхетенську відстань для числа кошиків $L=257$. Ці відстані складають 234, 196, 274, що підкреслює досить значиму близькість еталонів у просторі ознак, так як максимум такої відстані дорівнює 1000 за числом дескрипторів для пари описів. Найменша відстань досягнута у порівнянні 1 та 3-го еталонів рис. 1.

Для навчальної вибірки, коли на вхід подаються еталони, значення параметра точності $prec=1$ як для традиційного, так і для пропонованого методу з використанням хешування. Але в реальній ситуації, наприклад, при перетвореннях повороту, величина $prec$ коливається у межах до 0,47 з хешуванням та 0,53 без хешування з правильним визначенням класу.

Незважаючи на деяке зниження показника точності, у проведених експериментах класифікація здійснювалася вірно, тобто усі вхідні зображення з перетвореннями правильно отримали свій номер класу. Ці результати підтверджують ефективність розробленого методу.

Таким чином, із введенням хешування і зростанням числа кошиків точність незначно знижується, але практично не залежить від числа кошиків. Основним недоліком впровадження хешування традиційно вважається зростання необхідних обсягів пам'яті комп'ютера [3, 6, 7].

Висновки

Розглянуті у роботі методи класифікації базуються на принципі «порівняння з еталоном» і можуть бути універсально застосовані до довільних векторів даних бітового виду. Ці методи базуються на двох різновидах класів – для цілісного опису (об'єкт та еталони) та для окремих компонентів опису. При застосуванні хеш-структур ключовим моментом є вибір результативної та адаптованої до даних хеш-функції, яка здійснює часткову класифікацію, не змінюючи дані.

Під час реалізації запропонованих підходів можливі варіанти оброблення з використанням наявної структурованості еталонних даних, тобто за окремими описами еталонів. Це дає можливість подальшого скорочення обсягів обчислень шляхом введення логічного аналізу за результатом послідовного обчислення релевантності для компонентів бази еталонів.

Наукову новизну проведеного дослідження складає розроблення продуктивного методу класифікації зображень на основі впровадження швидкісного пошуку із використанням хеш-структур, що зменшує обсяг обчислень в десятки разів.

Практична значущість роботи полягає у побудові моделей класифікації у структурованому просторі даних, підтвердженні працездатності запропонованих модифікацій на прикладах зображень, створенні програмних моделей для впровадження розроблених методів класифікації у системах комп'ютерного зору.

Перспективи дослідження можуть бути пов'язані із введенням логічного оброблення розподілів даних всередині хеш-кошиків, вивченням завадостійкості розроблених методів та оцінюванні їх прикладної результативності стосовно об'ємних колекцій зображень.

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: <http://dx.doi.org/10.30837/978-617-7859-69-6>.
2. Гороховатський В.О., Гадецька С.В., Стяглик Н.І., Власенко Н.В. Класифікація зображень на підставі ансамблю статистичних розподілів за класами еталонів для компонентів структурного опису. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2020. №4. С. 85–94. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-9>.
3. Gorokhovatskiy V.A., Gorokhovatskiy A. V., Peredrii Ye.O. Hashing of Structural Descriptions at Building of the Class Image Descriptor, Computing of Relevance and Classification of the Visual Objects. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. Vol. 77 (13). P. 1159–1168. DOI: <http://dx.doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v77.i13.40>.
4. Manning C.D., Raghavan P., and Schütze H. Introduction to Information Retrieval. Cambridge : University Press, 2008. 528 p.
5. 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*, 2018, pp. 593-597, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>.
6. Ахо А., Хопкрофт Д., Ульман Д. Структуры данных и алгоритмы. Москва : Издательский дом «Вильямс», 2003. 384 с.
7. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. М.: ИД Вильямс, 2005. 1296 с.
8. Berman A., Shapiro L. A flexible image database system for content-based retrieval. *Computer Vision and Image Understanding*. Vol. 75, No. 1/2. 1999. P. 175–195.
9. Kinoshenko D., Mashtalir V., Yegorova E., Vinarsky V. Hierarchical partitions for content image retrieval from large-scale database. Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition / Perner P., Imlya A. (Eds.). *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. Springer-Verlag, 2005. Vol. 3587. P. 445–455.
10. Babenko A., Slesarev A., Chigorin A., Lempitsky V. Neural codes for image retrieval. Conference Paper. *Lecture Notes in Computer Science* (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2014, 8689 LNCS(PART 1), p. 584–599.

11. Gorokhovatskiy V., Putyatin Ye., Gorokhovatskiy O., Peredrii O. Quantization of the Space of Structural Image Features as a Way to Increase Recognition Performance. *The Second IEEE Int. Conf. on DataStream Mining & Proc. 21-25 August 2018*, Lviv, Ukraine. P. 464–467.
12. Лесковец Юре, Раджараман Ананд, Ульман Джеффри Д. Анализ больших наборов данных. Москва : ДМК Пресс, 2016. 498 с.
13. Гороховатский В.А., Пуятин Е.П., Столяров В.С. Исследование результативности структурных методов классификации изображений с применением кластерной модели данных. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. 2017. №3 (42). С. 78–85.
14. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. Москва : ДМК Пресс, 2015. 400 с.
15. Гороховатский В.А. Иерархия пространственных отношений структурных признаков в задачах сопоставления визуальных объектов. Системи управління, навігації та зв'язку: зб. наук. пр. К.: ЦНДІ навігації і управління, 2008. Вип. 3(7). С. 85–89.
16. Gorokhovatskiy O., Gorokhovatskiy V., and Peredrii O. Analysis of Application of Cluster Descriptions in Space of Characteristic Image Features, *Data*, 2018, 3(4), 52. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/data3040052>.
17. Nong Ye. *Data Mining: Theories, Algorithms, and Examples* (1st. ed.). CRC Press, Inc., USA. 2013.
18. ORB feature detector and binary descriptor. URL: https://scikit-image.org/docs/dev/auto_examples/features_detection/plot_orb.html.
19. 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. P. 6818-6826.
20. Ethan Rublee, Vincent Rabaud, Kurt Konolige, Gary Bradski. ORB: “An efficient alternative to SIFT or SURF”, *International conference on computer vision*. 2011. IEEE. P. 2564-2571.
21. Yakovleva, O., Nikolaieva, K. Research of descriptor based image normalization and comparative analysis of SURF, SIFT, BRISK, ORB, KAZE, AKAZE descriptors. *Advanced Information Systems*. 2020. Vol. 4, No. 4. P. 89-101. DOI: <http://dx.doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.13>.

REFERENCES

1. Gorokhovatskiy, V.O. and Gadetska, S.V. (2020), *Statistical processing and data mining in structural image classification methods* (monograph), FLP Panov A.N., Kharkiv, 128 p., DOI: <http://dx.doi.org/10.30837/978-617-7859-69-6>.
2. Gorokhovatskiy, V.O, Gadetska, S.V., Styahlyk, N.I. and Vlasenko, N.V. (2020), “Classification of images based on an ensemble of statistical distributions by standard classes for structural description components”, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, No. 4, pp. 85–94, DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-9>.
3. Gorokhovatskiy, V.A., Gorokhovatskiy, A.V. and Peredrii, Ye.O. (2018), “Hashing of Structural Descriptions at Building of the Class Image Descriptor, Computing of Relevance and Classification of the Visual Objects”, *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 77 (13), pp. 1159–1168, DOI: <http://dx.doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v77.i13.40>.
4. Manning, C.D., Raghavan, P. and Schutze, H., (2008), *Introduction to Information Retrieval*, Cambridge, University Press, 528 p.
5. Svyrydov, A., Kuchuk, H. and Tsiapa, O. (2018), “Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study”, *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*, pp. 593-597, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>.
6. Akho, A., Hopcroft, D. and Ulman, D. (2003), *Data structures and algorithms*, Williams, Moscow, 384 p.
7. Cormen, T., Leizerson, Ch., Ryvest, R. and Shtain, K. (2005), *Algorithms: construction and analysis*, 2-nd edition, Publishing house "Williams", Moscow, 1296 p.
8. Berman, A. and Shapiro, L. (1999), “A flexible image database system for content-based retrieval”, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 75, No. ½, pp. 175–195.
9. Kinoshenko, D., Mashtalir, V., Yegorova, E. and Vinarsky, V. (2005), “Hierarchical partitions for content image retrieval from large-scale database. Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition” / Perner, P., Imlya, A. (Eds.), *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. Springer-Verlag. Vol. 3587. P. 445–455.
10. Babenko, A., Slesarev, A., Chigorin, A. and Lempitsky, V. (2014), “Neural codes for image retrieval”, Conference Paper. *Lecture Notes in Computer Science* (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 8689 LNCS (PART 1), pp. 584-599.
11. Gorokhovatskiy, V., Putyatin Ye., Gorokhovatskiy, O. and Peredrii, O. (2018), “Quantization of the Space of Structural Image Features as a Way to Increase Recognition Performance”, *The Second IEEE International Conference on DataStream Mining & Processing 21-25 August 2018*, Lviv, Ukraine, pp. 464–467.
12. Leskovets, Yure, Radzharaman, Anand and Ulman, Dzheffry D. (2016), *Analyzing large datasets*, DMK Press, Moscow, 498 p.
13. Gorokhovatskiy, V.A., Putyatin, E.P. and Stolyarov, V.S. (2017), “Study of the effectiveness of structural methods of image classification using a cluster data model”, *Radioelectronics, informatics, management*, No. 3 (42), pp. 78–85.
14. Flach, P. (2015), *Machine learning. The science and art of building algorithms that extract knowledge from data*, DMK Press, Moscow, 400 p.
15. Gorokhovatskiy, V.O. (2008), “Hierarchy of spatial relations of structural features in the tasks of matching visual objects”, *Control, navigation and communication systems*, collection of scientific papers, Is. 3(7), pp. 85–89.
16. 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: <http://dx.doi.org/10.3390/data3040052>.
17. Nong, Ye. (2013), *Data Mining: Theories, Algorithms, and Examples*, 1st. ed., CRC Press, Inc., USA.
18. (2020), *ORB feature detector and binary descriptor*, available at: https://scikit-image.org/docs/dev/auto_examples/features_detection/plot_orb.html.
19. Xu. Zhang, Felix, X. Yu, Svebor, Karaman and Shih-Fu, Chang (2017), “Learning Discriminative and Transformation Covariant Local Feature Detectors”, *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 6818-6826.

20. Ethan, Rublee, Vincent, Rabaud, Kurt, Konolige and Gary, Bradski (2011), ORB: "An efficient alternative to SIFT or SURF", *2011 International conference on computer vision*, IEEE, pp. 2564-2571.
21. Yakovleva, O. and Nikolaieva, K. (2020), "Research of descriptor based image normalization and comparative analysis of SURF, SIFT, BRISK, ORB, KAZE, AKAZE descriptors", *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 4, pp. 89-101, DOI: <http://dx.doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.13>.

Received (Надійшла) 24.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 09.04.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

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

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

e-mail: gorokhovatsky.vl@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7839-6223>.

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

Nataliia Vlasenko – Candidate of Technical Sciences, Senior lecturer at the Department of Informatics and Computer Engineering, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: gorokhovatskaja@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6841-7086>.

Рибалка Михайло Олексійович – студент кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Mykhailo Rybalka – student of Computer Science Department, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: mykhailo.rybalka@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4081-0281>.

Применение методов хеширования данных для ускорения классификационных решений в структурных методах распознавания изображений

В. А. Гороховатский, Н. В. Власенко, М. А. Рыбалка

Аннотация. Предметом исследований есть методы классификации изображений с помощью множества дескрипторов ключевых точек. **Цель** – повышение производительности методов классификации, в частности, ускорение временных показателей классификации путем внедрения средств хеширования для представления эталонных данных. Применяемые **методы**: детектор и дескрипторы ORB, средства хеширования данных, методы поиска в массивах данных, аппарат определения релевантности векторов на основе метрик, программное моделирование. Полученные **результаты**: разработан эффективный метод классификации изображений на основе внедрения скоростного поиска с использованием хэш-структур, что ускоряет вычисления в десятки раз; время классификации для рассмотренных экспериментальных описаний линейно возрастает с уменьшением числа хеш-корзин; выбор порога для значения минимума метрики при установлении класса для дескрипторов объекта существенно влияет на точность классификации; выбор такого порога может быть оптимизирован для фиксированных баз образцов; экспериментально достигнутая точность классификации указывает на работоспособность и результативность предложенного метода на основе хешированием данных. **Практическая значимость** работы – построение моделей классификации в 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 ORB; хеширование; линейный поиск; хеш-корзина; скорость обработки; точность классификации.

Application of data hashing tools to accelerate classification decisions in structural image recognition methods

Volodymyr Gorokhovatskyi, Nataliia Vlasenko, Mykhailo Rybalka

Анотація. The subject of this research is the image classification methods based on a set of key points descriptors. The goal is to increase the performance of classification methods, in particular, to improve the time characteristics of classification by introducing hashing tools for reference data representation. **Methods** used: ORB detector and descriptors, data hashing tools, search methods in data arrays, metrics-based apparatus for determining the relevance of vectors, software modeling. The obtained **results**: developed an effective method of image classification based on the introduction of high-speed search using hash structures, which speeds up the calculation dozens of times; the classification time for the considered experimental descriptions increases linearly with decreasing number of hashes; the minimum metric value limit choice on setting the class for object descriptors significantly affects the accuracy of classification; the choice of such limit can be optimized for fixed samples databases; the experimentally achieved accuracy of classification indicates the efficiency of the proposed method based on data hashing. **The practical significance** of the work is - the classification model's synthesis in the hash data representations space, efficiency proof 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; ORB descriptor; hashing; linear search; hash; processing speed; classification accuracy.

Information systems modeling

УДК 323.774

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.03>

С. П. Коваленко, С. В. Герасимов, А. Ф. Волков, С. І. Корсунов, М. І. Оборонов

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

МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДРОЗДІЛІВ ПРОТИПОВІТРЯНОЇ ОБОРОНИ

Анотація. Актуальним питанням сучасних локальних конфліктів є обґрунтування спроможності підрозділів протиповітряної оборони виконувати свої безпосередні завдання з прикриття з повітря дій наземних сил. Особливо актуально це питання постає в локальних конфліктах, коли простір, на якому необхідно виконувати поставлене завдання, розтягнутий по ширині та глибині територіального простору. **Мета статті** – розробка моделі оцінювання ефективності прикриття дії наземних сил підрозділами ППО в нових позиційних районах, які змінилися в розмірах по ширині та в глибину. **Результат.** В статті пропонується модель, яка дозволяє оцінювати ефективність прикриття озброєння та військової техніки і інфраструктури наземних сил підрозділами протиповітряної оборони. **Висновки.** Розроблена модель допоможе командирі підрозділу протиповітряної оборони оцінювати варіанти своєї структури, вибирати з них раціональні, з кращою ефективністю прикриття та допомагає йому прийняти правильне рішення на відбиття ударів з повітря. Запропонована модель дозволяє оцінювати ефективність прикриття наземних сил при різних вхідних даних і спроможність підрозділів протиповітряної оборони прикрити наземні сили залежно від місцевості та дій противника.

Ключові слова: модель; розрахунок ефективності; локальні конфлікти; протиповітряна оборона; граф можливих станів; повітряний простір.

Вступ

Постановка проблеми. Своє основне завдання підрозділи протиповітряної оборони (ППО) виконують, прикриваючи з повітря озброєння та військової техніки і інфраструктуру наземних сил, безпосередньо в складі цих сил [1, 2]. Локальні конфлікти все частіше розв'язуються у світі через неспроможність вирішити критичну ситуацію між двома протидіючими сторонами мирним шляхом, залучаючи політичні та дипломатичні сили для урегулювання. Це призводить до ситуації, яку необхідно вирішувати військовим командирам в короткий термін часу, заздалегідь не знаючи ширини та глибини територіального простору, на якому необхідно буде приймати рішення з прикриття наземних сил з повітря. Як правило в невідомому районі простір, на якому необхідно виконувати поставлене завдання, розтягнутий по ширині, що призведе до збільшення позиційних районів наземних сил як по ширині, так і в глибину. Це, в свою чергу, приведе до збільшення навантаження на підрозділи ППО з прикриття цих наземних сил з повітря. А за короткий термін часу військовим командирам складно прийняти правильне рішення, через те, що вони не знають про здатність підрозділів ППО прикрити дії наземних сил з повітря в новому позиційному районі. Для прийняття правильного рішення командирі протиповітряного підрозділу різного рівня ієрархії необхідно обґрунтувати можливість ефективного виконання ними бойового завдання. Тому пропонується модель, яка дозволяє оцінити ефективність прикриття підрозділами ППО дії наземних сил в новому, невідомому позиційному районі. Крім того, запропонована модель допомагає військовому командирі в автоматичному оцінюванні спроможності підрозділів ППО прикрити наземні сили з повітря [3, 4].

Виходячи з цього, розробка моделі розрахунку ефективності прикриття озброєння та військової техніки і інфраструктуру наземних сил підрозділами протиповітряної оборони в нових позиційних районах, які змінилися в розмірах по ширині та в глибину, є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Все частіше в багатьох джерелах проводять аналіз ефективності застосування різних підрозділів в локальних конфліктах останніх десяти років [1-14]. Актуальним питанням на сьогоднішній день є й організація ППО, яка повинна забезпечувати прикриття з повітря усіх підрозділів, що залучаються для розв'язання завдань в конфліктних ситуаціях. Успіх будь-яких бойових дій залежить від вміння управління та наявності засобів автоматизації процесу управління [1-8], у яких алгоритми та математичний апарат [4, 5] дозволить за дуже короткий час вирішувати питання збору [4-9], обробки інформації та цілерозподілу цілей [10-14] між підрозділами ППО, що залучаються для прикриття дій наземних сил.

Мета статті – розробка моделі оцінювання ефективності прикриття дії наземних сил підрозділами ППО в нових позиційних районах, які змінилися в розмірах по ширині та в глибину. Модель пропонується використовувати в системах прийняття рішення для допомоги командирі прийняти правильне рішення на прикриття з повітря дії наземних сил.

Виклад основного матеріалу

Сучасні локальні військові конфлікти відрізняються своєю непередбачуваністю та швидкою зміною обстановки. Досвід останніх локальних військових конфліктів в Сирії та Нагорному Карабасі підтверджує дуже широке використання комп'ютерних технологій і безпілотних засобів розвідки та нападу, змінивши підхід до ведення бойових дій, через широке

застосування комп'ютерних технологій та роботизацію усіх процесів в бойовому застосуванні озброєння та військової техніки [8]. Виходячи з цього необхідно проаналізувати можливості діючих засобів ППО з прикриття дії наземних сил з повітря в складній ситуації при локальних конфліктах, коли наземні сили розтягнуті по ширині. В цій непростій ситуації стоїть завдання з дослідження можливостей підрозділів ППО прикрити площинні об'єкти наземних сил при збільшенні їх позиційних районів.

Для вирішення поставленого наукового завдання пропонується застосувати теорію ймовірностей. Відносно положень теорії ймовірностей будемо рахувати, що площі зон ураження зенітних комплексів (площа прикриття об'єкту) відноситься до площі позиційного району дії наземних сил, як відношення ймовірності знищення цілі в зоні ураження зенітних комплексів до ймовірності прикриття підрозділами ППО. Виходячи зі зробленого припущення можна розрахувати ймовірність прикриття підрозділами ППО озброєння та військової техніки і інфраструктури наземних сил.

На даний час для оповіщення підрозділів ППО про напад повітряного противника розроблена нова система автоматизованого управління засобами ППО різного рівня ієрархії нового покоління. Крім цього, для управління підрозділами ППО розроблений відповідний комп'ютерний програмний комплекс [9]. Він призначений для автоматизації процесів збору, обробки, відображення та видачі інформації про повітряну обстановку на неавтоматизованих командних пунктах, пунктах управління частин і підрозділів ППО. Але жоден з них не допомагає командирів підрозділів ППО різного рівня ієрархії в прийнятті правильного рішення на прикриття дії наземних сил від ударів з повітря. Тому пропонується модель, яка б допомагала командирів підрозділів ППО різного рівня ієрархії в прийнятті рішення на прикриття дії наземних сил з повітря в новому невідомому районі при локальних конфліктах.

Розглянемо протиповітряний бій як дуельні ситуації між засобами повітряного нападу (ЗПН) та зенітними ракетними комплексами (ЗРК) і зенітними артилерійськими комплексами (ЗАК) підрозділів ППО з прикриття дії наземних сил. Розрізнятимемо можливі стани S_{ij} протиповітряного бою по кількості i уражених ЗРК в цьому стані та числу j цілей, що одночасно обстрілюються. Тоді, з точки зору можливості обстрілу та знищення цілей, можна виділити три основні стани ЗРК (ЗАК): S_{00} – не уражений, вільний; S_{01} – не уражений, обстрілює одну ціль; S_{10} – уражений, ціль не обстрілює [1].

Перехід із стану S_{00} в стан S_{01} можливий при виявленні чергової цілі противника, що проходить через зону ураження ЗРК (ЗАК). Частота таких переходів пропорційна інтенсивності (I зпн/хв.) удару, які відбито, представлена на рис. 1 [1, 2].

Обстріл цілі може тривати деякий випадковий час циклу стрільби з математичним сподіванням і може закінчитися поразкою ЗРК (ЗАК) (перехід в стан S_{10} на рис. 1 з ймовірністю P^* ($0 < P^* \leq 1$)), або

може мати благополучний для ЗРК (ЗАК) результат з ймовірністю $(1 - P^*)$. Кожна обстріляна ціль може бути знищена з ймовірністю P_{zn} .

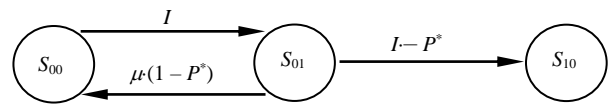


Рис. 1. Частота переходів із стану в стан ЗРК (Fig. 1. Frequency of transitions from state to state SAM)

Припустимо, що своєчасно виявляються усі цілі та поразка ЗРК можлива тільки в дуельному бою. Тоді для графа (рис. 1) можна записати систему диференціальних рівнянь Чепмена-Колмогорова, яка описує протиповітряний бій [1]

$$\begin{cases} \dot{P}_{00} = -I \cdot P_{00} + \mu \cdot (1 - P^*) \cdot P_{01}; \\ \dot{P}_{01} = -\mu \cdot P_{01} + I \cdot P_{00}; \\ \dot{P}_{10} = \mu \cdot P^* \cdot P_{01}. \end{cases} \quad (1)$$

На початку бою ЗРК (ЗАК) боєготовий і цілі в його зоні ураження відсутні

$$P_{00}(0) = 1, \quad P_{01}(0) = 0, \quad P_{10}(0) = 0. \quad (2)$$

Інтегруємо (1) за початкових умов (2):

$$\begin{aligned} P_{00} &= \frac{1}{\alpha} \left[(1 - \rho) \cdot sh \frac{\zeta \cdot t}{2} + \alpha \cdot ch \frac{\zeta \cdot t}{2} \right] \cdot e^{-\frac{(1+\rho)}{2} \mu \cdot t}; \\ P_{01} &= 2 \cdot \frac{\rho}{\alpha} \cdot sh \frac{\zeta \cdot t}{2} \cdot e^{-\frac{(1+\rho)}{2} \mu \cdot t}; \\ P_{10} &= 1 - \frac{1}{\alpha} \left[(1 + \rho) \cdot sh \frac{\zeta \cdot t}{2} + \alpha \cdot ch \frac{\zeta \cdot t}{2} \right] \cdot e^{-\frac{(1+\rho)}{2} \mu \cdot t}, \end{aligned} \quad (3)$$

де $\rho = \frac{I}{\mu}$; $\alpha = \sqrt{1 + \rho + 2\rho \cdot (1 - P^*)}$; $\zeta = \alpha \cdot \mu$.

Математичне сподівання кількості обстріляних цілей з моменту t бою пропорційно часу перебування ЗРК (ЗАК) в зайнятому стані та його продуктивності $\mu = 1/T_u$.

$$\begin{aligned} N(t) &= \mu \int_0^t P_{01}(\tau) d\tau = 1 / \left(\alpha \cdot P^* \right) \times \\ &\times \left[\alpha - \left((1 + \rho) \cdot sh \frac{\zeta \cdot t}{2} + \alpha \cdot ch \frac{\zeta \cdot t}{2} \right) \cdot e^{-\frac{(1+\rho)}{2} \mu \cdot t} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Математичне сподівання $N_{zn}(t)$ кількості знищених цілей пропорційне кількості $N(t)$ боїв

$$N_{zn}(t) = P_{zn} \cdot N(t). \quad (5)$$

Тоді граничні значення математичних сподівань кількості боїв (обстріляних цілей) і знищених ЗПН при необмеженому боєкомплекті ЗРК (ЗАК) і кількості ЗПН в ударі знайдемо з виразів (4) і (5)

$$N_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} N(t) = 1 / P^*; \quad (6)$$

$$N_{zn \infty} = P_{zn} \cdot \frac{1}{P^*}. \quad (7)$$

Наслідком переходу ЗРК (ЗАК) із одного стану в інший є рівність

$$n^*(t) = N^*(t) = N_{y^*}(t). \quad (8)$$

Знайдемо відносну кількість боїв, розділивши вираз (4) на співвідношення (6)

$$N^*(t) = 1 - \frac{1}{\alpha} \left[(1+\rho) \cdot sh \frac{\zeta \cdot t}{2} + \alpha \cdot ch \frac{\zeta \cdot t}{2} \right] \cdot e^{-\frac{(1+\rho) \cdot \mu \cdot t}{2}}. \quad (9)$$

Вираз для відносної кількості $N_{зпн}^*(t)$ знищених ЗПН співпадає з (9). Дійсно,

$$N_{зпн}^*(t) = \frac{N_{зпн}(t)}{N_{зпн\infty}} = \frac{N(t) \cdot P_{зпн}}{N_{\infty} \cdot P_{зпн}} = \frac{N(t)}{N_{\infty}} = N^*(t). \quad (10)$$

Відносне значення математичного сподівання кількості уражених ЗРК (ЗАК) співпадає з P_{10} :

$$n^*(t) = n(t)/n_0 = n(t) = 0 \cdot (P_{00} + P_{01}) + 1 \cdot P_{10} = P_{10}. \quad (11)$$

Порівнюючи вираз (3) для P_{10} і (9), переконуємося в їх тотожності, що з обліком (10) дозволяє підтвердити істинність рівності (8) відносних втрат сторін для даної моделі. Таким чином, отримана модель протиповітряного бою в умовах повної інформації є адекватною реальному процесу з точністю прийнятих гіпотез [1, 2].

Загальний потік цілей інтенсивності I розділяється на потік тих, які виявляються (інтенсивності $I_{вияв}$) і ЗПН, які не виявляються (інтенсивності I_{Π}), які можуть безкарно вражати ЗРК (ЗАК). Для пригнічення системи ППО противник виділяє деяку частину Q ЗПН удару ($0 \leq Q \leq 1$). Тому можна вважати, що із складу ЗПН, які не виявляються, частину Q цілей безкарно атакують і знищують ЗРК (ЗАК) з ймовірністю $P_{зпн}$ в результаті кожного безкарного удару [6]. Якщо позначити ймовірність своєчасного виявлення цілей, $P_{вияв}$, то інтенсивність I_{Π} безкарних знищуючих ударів знайдеться

$$I_{\Pi} = I \cdot (1 - P_{вияв}) \cdot Q \cdot P_{зпн}. \quad (12)$$

Таким ударам ЗРК (ЗАК) піддається, як у вільному S_{00} , так і в зайнятому стрільбою S_{01} стані. Крім того, частина Q цілей із складу своєчасно виявлених може також виконувати безкарні знищуючі удари по ЗРК (ЗАК), якщо застають батарею зайнятою обстрілом (в стані S_{01}). Нехтуючи можливістю відновлення ураженого ЗРК (ЗАК) за час бою, отримаємо граф можливих станів і переходів для ЗРК (ЗАК) в процесі бою, представлений на рис. 2, де

$$I_{\epsilon} = \mu \cdot (1 - P^*); \quad I_{\Pi} = I \cdot (1 - P_{вияв}) \cdot Q \cdot P_{зпн}; \quad (13)$$

$$I_{вияв} = I \cdot P_{вияв}; \quad I_{\nu} = \mu \cdot P^* + I_{\Pi} + I_{вияв} \cdot Q \cdot P_{зпн}.$$

Тоді система диференціальних рівнянь для ймовірності станів протиповітряного бою ЗРК (ЗАК) приймає вигляд [1]:

$$\begin{aligned} \dot{P}_{00} &= -(I_{вияв} + I_{\Pi}) \cdot P_{00} + I_{\epsilon} \cdot P_{01}; \\ \dot{P}_{01} &= -(I_{\epsilon} + I_{\nu}) \cdot P_{01} + I_{вияв} \cdot P_{00}; \\ \dot{P}_{10} &= I_{\Pi} \cdot P_{00} + I_{\nu} \cdot P_{01}, \end{aligned} \quad (14)$$

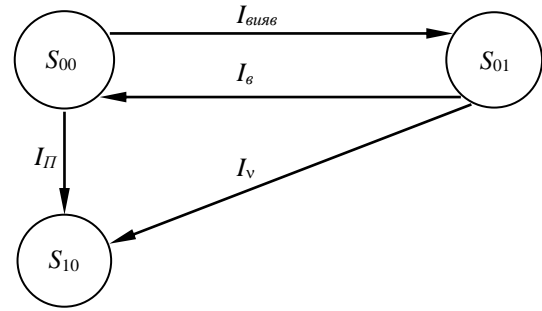


Рис. 2. Граф можливих станів і переходів ЗРК (Fig. 2. Graph of possible states and transitions of SAM)

звідки, після інтегрування за початкових умов (2) і з врахуванням (4), можна отримати

$$P_{00} = \left[(b_1 + a_1) \cdot e^{a_1 t} - (b_1 + a_2) \cdot e^{a_2 t} \right] / b_4;$$

$$P_{01} = \frac{I_{вияв}}{\chi_4} \left[e^{\gamma_1 t} - e^{\gamma_2 t} \right];$$

$$P_{10} = 1 - \frac{1}{\chi_4} \left[(\chi_1 + I_{вияв} + \gamma_1) \cdot e^{\gamma_1 t} - (\chi_1 + I_{об} + \gamma_2) \cdot e^{\gamma_2 t} \right]; \quad (15)$$

$$N(t) = \mu \cdot \frac{I_{вияв}}{\chi_4} \left[\frac{1}{\gamma_1} (e^{\gamma_1 t} - 1) - \frac{1}{\gamma_2} (e^{\gamma_2 t} - 1) \right],$$

$$\chi_1 = I_{\epsilon} + I_{\nu}; \quad \chi_2 = I_{вияв} + I_{\Pi}; \quad \chi_3 = \chi_1 + \chi_2;$$

де $\chi_4 = \sqrt{\chi_3^2 - 4 \cdot (\chi_1 \cdot \chi_2 - I_{вияв} \cdot I_{\epsilon})}; \quad (16)$

$$\gamma_1 = -\frac{1}{2} \cdot (\chi_3 - \chi_4); \quad \gamma_2 = -\frac{1}{2} \cdot (\chi_3 + \chi_4).$$

Для грубої оцінки сподіваних результатів протиповітряного бою угруповання ППО, включаючи n_0 одноканальних по цілі ЗРК (ЗАК), які відбивають удар противника інтенсивністю I зпн/хв., модель бою угруповання можна замінити сукупністю моделей боїв (15) поодиноких ЗРК (ЗАК), кожний з яких відбиває удари інтенсивності

$$I_1 = I/n_0, \quad (17)$$

а загальний результат знайти як суму результатів протиповітряних боїв поодиноких ЗРК (ЗАК).

Знаючи модель бою та порядок оцінки дій в цій моделі можна перейти до моделі, яка б оцінювала ефективність стрільби визначеного підрозділу та своїми результатами допомогла б військовому командирі підрозділу ППО оцінювати спроможність підрозділу ППО прикрити дії наземних сил з повітря і, як результат, прийняти правильне рішення.

Однією з умов успіху дій наземних сил стає їх надійна система ППО, завдання якої доводиться вирішувати в типових умовах інформаційного та вогневого протистояння з повітряним противником та в умовах жорсткого ліміту часу.

У складі завдань управління підрозділами ППО основними є: організація системи ППО до й у ході протиповітряного бою; своєчасне виявлення ЗПН противника та забезпечення засобів ППО бойовою інформацією [6]; управління вогнем різномірних засобів ППО – ЗРК (ЗАК).

Кожне з відмічених завдань є багатопараметричним, вирішується в реальному масштабі часу й в умовах неповної, неточної інформації та дезінформації з боку противника [7]. Якість рішення будь-якої з цих задач істотно впливає на результати ППО, тому для їх швидкого вирішення необхідно використовувати засоби автоматизації, які ще недосконалі на даний час в підрозділах ППО. В автоматизованих засобах необхідні алгоритмічні та апаратні засоби, які б могли вирішувати: синтез елементів раціональної структури інформаційних і вогневих засобів підрозділів ППО; рішення завдань цілерозподілу та цілевказівки за даними про цілі [7]; автоматичні передачі команд управління на вогневі засоби підрозділів ППО; отримання від вогневих засобів підрозділів ППО доповідей і даних про цілі; документування процесів бойової роботи та тренажу.

Для вирішення поставленого завдання перед підрозділами ППО потрібні моделі, які б дозволяли оцінювати ефективність бойового застосування ЗРК (ЗАК) з урахуванням варіанту їх організації та структури, а також модель прогнозу ефективності бойових дій системи ППО в динаміці умов сподіваних і поточних бойових дій, та з урахуванням параметрів структури інформаційних зв'язків підрозділів ППО. Такого комплексу моделей для системи ППО ще немає. Але є часткові аналітико-стохастичні моделі прогнозу ефективності бойових дій засобів ППО [2]. Тому, використовуючи їх, пропонується модель, яка все це враховує та допомагає командирі підрозділів ППО оцінювати варіанти своєї структури, вибирати раціональні, з кращою ефективністю прикриття та допомагає прийняти правильне рішення на відбиття ударів з повітря.

Модель оцінювання ефективності прикриття дії наземних сил підрозділами ППО бригади умовно зображена на рис. 3 у вигляді блок-схеми алгоритму оцінки ефективності ЗРК (ЗАК), вибору параметрів елементів і структури підрозділів ППО, пропозицій командирі про ефективність вибраної структури для прийняття рішення на ведення бойових дій.

Запропонована модель припускає вибір типового складу внутрішніх і зовнішніх джерел радіолокаційної інформації, напряму обміну даними, склад вирішуваних завдань обробки даних, формування рекомендацій по складу засобів ППО і по їх управлінню.

Після збору початкової інформації необхідної для розрахунків, визначаються параметри сподіваного удару ЗПН, дані для розрахунку параметрів структури і інформаційних зв'язків засобів ППО (блок 1).

Модель оцінки ефективності підрозділів ППО (блок 2) з урахуванням інформаційних зв'язків між ЗРК (ЗАК), які забезпечують прогноз ефективності стрільби вогневих засобів ППО в різних умовах сподіваних і поточних бойових дій з метою наступного вибору раціональних параметрів структури інформаційних зв'язків системи ППО. Таким чином, враховується кількість засобів радіолокаційної інформації та структура інформаційних зв'язків між ЗРК. Це впливає на середнє значення $P_{\text{вияв}}$ за час

протиповітряного бою з урахуванням знищення командного пункту [3-5].

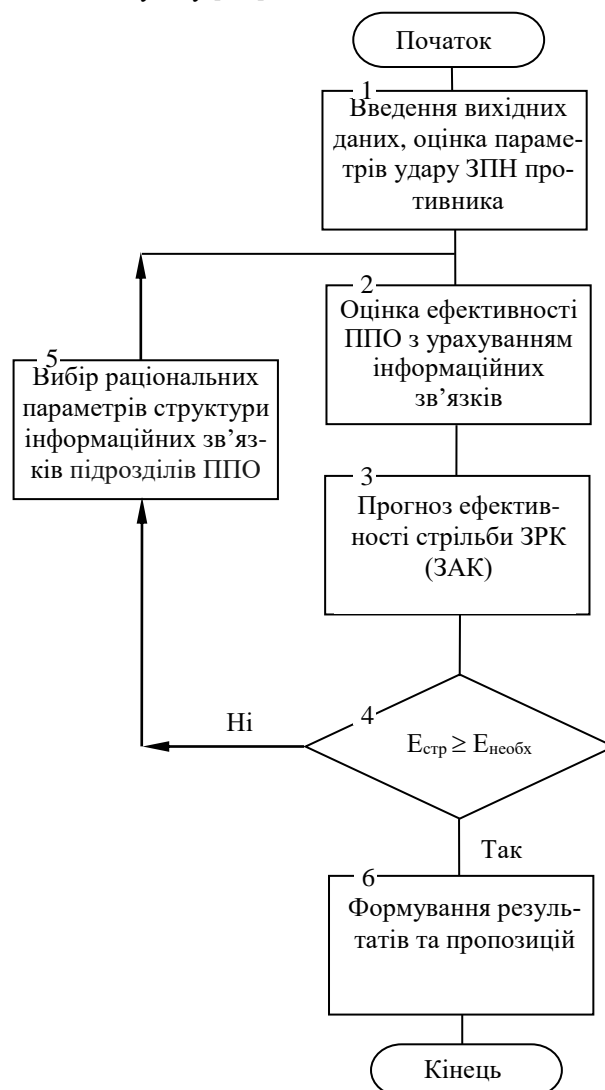


Рис. 3. Алгоритм розрахунку ефективності прикриття дії наземних сил підрозділами ППО
(Fig. 3. Algorithm for calculating efficiency covering the action of ground forces by air defense units)

Час t_2 , який залишився, визначається можливою ймовірністю виявлення цілей ЗРК (ЗАК) та з урахуванням перешкодової обстановки (він знаходиться в границях 0,2...0,4 від частки загального часу). Тоді середнє за часом бою значення ймовірності виявлення $P_{\text{вияв}}$ цілей в угрупованні ППО може бути визначене

$$P_{\text{вияв}}^{\text{ср}} = P_{\text{вияв}}^{\text{АЗВ}} \cdot \frac{t_1}{t_{\text{бою}}} + P_{\text{вияв}}^{\text{ССЦ}} \cdot \frac{t_2}{t_{\text{бою}}}, \quad (18)$$

де t_1 – середній час існування командного пункту наземних сил і централізованого управління вогнем; $t_2 = t_{\text{бою}} - t_1$, як середнє значення часу децентралізованого виконання завдань ЗРК (ЗАК) в ході протиповітряного бою.

Оцінка ефективності автоматизованого управління (блок 2) здійснюється по забезпеченню бойовою інформацією (інформацією для вирішення завдань цілевказівки та цілерозподілу ЗРК (ЗАК) по ці-

лям, які налітають). При якісному рішенні завдань збору, обробки радіолокаційної інформації та рішенні завдань цілевказівки та цілерозподілу, можна чекати: зменшення часу циклу стрільби за рахунок скорочення часу пошуку цілі, ухвалення рішення на обстріл і організацію стрільби в глибині зони ураження; зниження ймовірності знищення ЗРК (ЗАК) вогнем у відповідь ЗПН противника за рахунок скорочення циклу стрільби, а також додаткових заходів захисту ЗРК (ЗАК) (стрільба з запізненням включення високої напруги на випромінювання та наведення зенітних ракет за координатами цілевказівки) [3-5].

За результатами операцій блоку 2 готуються початкові дані ($P_{\text{вияв}}$, а також m і P^*) для розрахунків за формульною схемою блоку 3.

Модель прогнозу ефективності бойових дій вогневих засобів ППО (блок 3) дозволяє прогнозувати значення математичного сподівання кількості обстріляних $N_{\text{обс}}$ і знищених $N_{\text{знд}}$ ЗПН противника, кількості знищених ЗРК (ЗАК) і в спрощеному вигляді описується послідовністю формул для розрахунків з урахуванням динаміки протиповітряного бою:

1) визначається інтенсивність (I) удару ЗПН

$$I = \frac{N_{\text{ЗПН}}}{t_{\text{бою}}}; \quad (19)$$

2) визначається математичне сподівання кількості ЗПН в групах, у складі удару ЗПН

$$G_{\text{ЗПН}} = \sum_{i=1}^l i \cdot a_i; \quad (20)$$

3) визначається інтенсивність частини вхідного потоку ЗПН (по висоті польоту) і інтенсивність I_1 , що приходить на ЗРК (ЗАК) (значення j береться для тих висот, на яких цілі можуть бути обстріляні відповідно до їх тактико-технічних характеристик)

$$I_{\text{вх}} = I \cdot \sum_j BH_j; \quad I_1 = \frac{I}{n_0}; \quad (21)$$

4) визначається радіус зони ураження ЗРК (ЗАК) кожного типу з урахуванням доступної по висоті польоту частини вхідного потоку ЗПН з урахуванням кутів закриття

$$R_k^2 = \sum_j BH(H_j) \cdot R_k^2(H_j), \quad k = 1, \dots, q \quad (22)$$

5) знаходиться допоміжна величина, необхідна для розрахунків зон ураження

$$L = \sum_{k=1}^q m_k \cdot R_k^2; \quad (23)$$

6) визначається ймовірність (P) знищення ЗРК (ЗАК) k -го типу в ході одного протиповітряного бою з повітряною ціллю. Цю ймовірність приблизно можна оцінити з урахуванням сумарної середньої кількості основних і запасних позицій для застосування ЗРК (ЗАК) ($N_{\text{СП}}$, K_1) і кількості їх цільових каналів ($N_{\text{ЦК}}$, K_1)

$$P_k^* \cong \frac{0,5}{N_{\text{СП,К}} \cdot N_{\text{ЦК,К}}}, \quad k = \overline{1, q}; \quad (24)$$

7) визначається середнє значення продуктивності та ймовірність знищення ЗРК (ЗАК) у бою та ймовірність знищення цілі $P_{\text{зн}}$ при її обстрілі [1, 2]

$$\mu = \frac{1}{L} \cdot \sum_{k=1}^q \mu_k \cdot m_k \cdot N_{\text{ЦК,К}} \cdot R_k^2;$$

$$P^* = \frac{1}{L} \cdot \sum_{k=1}^q P_k^* \cdot m_k \cdot N_{\text{ЦК,К}} \cdot R_k^2; \quad (25)$$

$$P_{\text{зн}} = \frac{1}{L} \cdot \sum_{k=1}^q P_y^k \cdot m_k \cdot N_{\text{ЦК,К}} \cdot R_k^2;$$

8) знаходяться коефіцієнти визначення вкладів типів ЗРК (ЗАК) в загальний результат бойових дій підрозділів ППО

$$\alpha_k = \frac{\mu_k \cdot m_k \cdot N_{\text{ЦК,К}} \cdot R_k^2}{\sum_{k=1}^q \mu_k \cdot m_k \cdot N_{\text{ЦК,К}} \cdot R_k^2}, \quad k = 1, \dots, q; \quad (26)$$

9) визначається максимально можлива кількість ЗПН, які обстрілюються (N_{max}), в дуельних боях до моменту знищення усіх ЗРК (ЗАК) угруповання ППО, з умовою відсутності обмежень на кількість ЗПН в ударі, на час удару й на кількість ракет в ЗРК та боеприпасів в ЗАК

$$N_{\text{max}} = n_0 / P^*; \quad (27)$$

10) визначається середнє значення коефіцієнта перекриття зон ураження ЗРК (ЗАК) ППО

$$S_3^n = \frac{4}{L_{\text{ФР}} \cdot L_2} \cdot \sum_{k=1}^q m_k \cdot N_{\text{ЦК,К}} \cdot R_k^2; \quad (28)$$

11) знаходиться граничне значення коефіцієнта перекриття зон ураження ЗРК (ЗАК) ППО

$$S_3^c = \sum_{k=1}^q m_k \cdot N_{\text{ЦК,К}}; \quad (29)$$

12) визначається оціночне значення коефіцієнта перекриття зон ураження ЗРК (ЗАК) ППО

$$S_3 = \min(S_3^n; S_3^c); \quad (30)$$

13) знаходиться проміжне значення коефіцієнта завантаження ЗРК (ЗАК) угруповання ППО

$$\rho = I_1 / \mu; \quad (31)$$

14) визначається оціночне значення коефіцієнта участі ЗРК (ЗАК) у бою з урахуванням ефекту «неповнодоступності» угруповання ППО (розташування на місцевості, переміщення для зміни позиції)

$$a = \begin{cases} 1,0 & \text{при } S_3 < 1; \\ 1,33 - 0,32 \cdot S_3 - 0,02 \cdot S_3^2, & \text{інакше;} \end{cases}$$

$$b = \begin{cases} 0,84 - 0,47 \cdot S_3 - 0,4 \cdot S_3^2, & \text{при } S_3 < 1; \\ 0, & \text{інакше;} \end{cases} \quad (32)$$

$$K_y = \begin{cases} 1,0, & \text{при } S_3 > 10; \\ 1 - a \cdot (b + \rho) \cdot \exp(-\rho), & \text{інакше;} \end{cases}$$

15) оцінка коефіцієнта, який враховує груповий склад ЗПН в ударі

$$\eta = \begin{cases} S_3 / G_{ЗПН}, & \text{при } S_3 < G_{ЗПН}; \\ 1, & \text{інакше}; \end{cases} \quad (33)$$

16) визначається коефіцієнт завантаженості ЗРК

$$\rho_1 = \rho \cdot K_y \cdot \eta; \quad (34)$$

17) знаходиться значення відносних втрат сторін в динаміці бою (з урахуванням мобільних ЗРК (ЗАК), розмірів їх зони ураження, стрільби під час руху та з короткої зупинки, долі (Q) ЗПН, які виділяються для знищення ЗРК і з урахуванням безкарних ударів по позиціях їх розташування) [1, 2, 11]:

$$\begin{aligned} I_{вияв} &= I_1 \cdot P_0 \cdot K_y; \\ I_{П} &= I_1 \cdot (1 - P_0); \\ I_v &= \mu \cdot P^* + I_1 \cdot Q \cdot P_{yz}; \\ I_e &= \mu \cdot (1 - P^*); \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \chi_1 &= I_e + I_v; \quad \chi_2 = I_{вияв} + I_{П}; \quad \chi_3 = \chi_1 + \chi_2; \\ \chi_4 &= \sqrt{\chi_3^2 - 4 \cdot (\chi_1 \cdot \chi_2 - I_{вияв} \cdot I_e)}; \end{aligned} \quad (36)$$

$$\gamma_1 = \frac{\chi_3 - \chi_4}{2}; \quad \gamma_2 = \frac{\chi_3 + \chi_4}{2}; \quad (37)$$

18) знаходиться значення математичного сподівання величини відносних втрат сторін $P_{10}(t)$, кількість обстріляних цілей [1]

$$P_{10}(t) = 1 - \frac{1}{\chi_4} \cdot \left[(\chi_1 + I_{вияв} - \gamma_1) \cdot e^{-\gamma_1 t} - (\chi_1 + I_{вияв} - \gamma_2) \cdot e^{-\gamma_2 t} \right]; \quad (38)$$

$$W_y = P_y \cdot N_{обс.1}; \quad (39)$$

$$N_{обс.1} = \eta \cdot \mu \cdot \frac{I_{вияв}}{\chi_4} \cdot \left[\frac{(1 - e^{-\gamma_1 t})}{\gamma_1} - \frac{(1 - e^{-\gamma_2 t})}{\gamma_2} \right]; \quad (40)$$

20) знаходиться кількість обстріляних $N_{обс}$ і знищених $N_{зн}$ ЗПН, а також знищених ЗРК $n_{зн.зрк}$

$$\begin{aligned} N_{обс} &= N_{обс.1} \cdot n_0; \quad N_{зн} = W_y \cdot n_0; \\ n_{зн.зрк} &= P_{10}(t) \cdot n_0; \end{aligned} \quad (41)$$

21) знаходиться розподіл математичного сподівання кількості втрат сторін і обстрілу ЗПН противника по типах ЗРК

$$\begin{aligned} N_{обс_k} &= N_{обс} \cdot \alpha_k; \quad N_{зн_{ик}} = N_{зн} \cdot \alpha_k; \\ n_{зн.зрк_k} &= n_{зн.зрк} \cdot \alpha_k; \quad k = \overline{1, q}; \end{aligned} \quad (42)$$

22) знаходиться оцінка математичного сподівання кількості ($N_{p-\delta}$) знищених об'єктів прикриття типу ЗРК (ЗАК) [1]

$$N_{p-\delta}^{3H} = \min \left(N_{p-\delta}^H; \left(N_{ЗПН} - N_{зн_{ик}} \right) / n_1 \right); \quad (43)$$

$$N_{p-\delta} = N_{p-\delta}^H - N_{p-\delta}^{3H}; \quad (44)$$

де $P_{вияв}$ – ймовірність своєчасного виявлення ЗПН противника; n_0 – початкова кількість ЗРК (ЗАК) в угрупованні ППО; n_1 – полігонний наряд ЗПН для знищення наземного об'єкту; $N_{p-\delta}^H$ – початкова кількість не знищених наземних об'єктів; $N_{p-\delta}^{3H}$ – знищені наземні об'єкти; $N_{ЗПН}$ – кількість ЗПН противника в ударі; P^* – ймовірність знищення ЗРК (ЗАК) повітряною ціллю за період одного циклу стрільби; μ – продуктивність ЗРК (ЗАК) по обстрілу цілей.

Після визначення сподіваних значень показників ефективності стрільби ЗРК (ЗАК) системи ППО, у разі їх незадовільного значення (блок 4) слідує перехід до блоку вибору раціональних параметрів структури інформаційних зв'язків системи ППО (блок 5) і далі – на повторення розрахунків.

Інакше рішення задачі оцінки ефективності та вибору раціональних параметрів структури інформаційних зв'язків ЗРК (ЗАК) системи ППО вважається закінченим (блок 6). За наявності підготовлених програм таке завдання може вирішуватися, як завчасно, так і в ході бою.

Висновки

У статті запропонована модель оцінювання ефективності прикриття дій наземних сил підрозділами ППО. Розроблена модель дає можливість оцінювати ефективність ведення бойових дій ЗРК (ЗАК) при відбитті нападу з повітря, вибрати параметри елементів і структуру підрозділів ППО. Вона допомагає командирі підрозділів ППО різного рівня ієрархії оцінювати варіанти своєї структури, вибрати раціональні інформаційні зв'язки з кращою ефективністю прикриття та допомагає прийняти правильне рішення на відбиття ударів з повітря.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко В.І. Бойове застосування високоточних засобів поразення і особливості боротьби з ними / В.І. Ткаченко, Є.І. Ряполов, Є.Б. Смірнов та ін. – Х.: ХНУПС, 2016. – 272 с.
2. Городнов В.П. Моделювання й оцінка ефективності бойових дій військ (сил) протиповітряної оборони: теорія, практика, історія розвитку / В.П. Городнов, Г.А. Дробаха, М.О. Єрмошин. – Х.: ХВУ, 2004. – 410 с.
3. Метод автоматизованої обробки інформації на ПУ ППО механізованої (танкової) бригади при паралельних та послідовних потоках інформації / С.П. Коваленко, В.М. Цвігун, І.В. Конєва, С.Г. Леушин // Системи обробки інформації. – 2004. – №7(35). – С. 71-76.
4. Ярош С.П. Обґрунтування організації зенітного ракетно-артилерійського прикриття угруповань військ з застосуванням міжвидових мобільних вогневих підрозділів ППО / С.П. Ярош, Б.М. Рябуха, Р.А. Соломонович // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2020. – № 2(39). – С. 77-82. – DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.39.09>.
5. Дробаха Г.А. Взаємодія тактико-вогневих підрозділів зенітних ракетних військ та протиповітряної оборони сухопутних військ при вирішенні завдань протиповітряної оборони / Г.А. Дробаха, Б.А. Генев, Г.М. Зубрицький // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – № 1(14). – С. 90-93.

6. Borisenko M.V. Development of optimum navigation information processing algorithm / M.V. Borisenko, S.V. Herasimov, O.I. Kostenko, D.V. Makarchuk // *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*. – 2018. – 3(32). – Pp. 38-44. – DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2018.32.06>.
7. Ефективний розподіл цілей між підрозділами ППО СВ – показник відверненого збитку військам / С.П. Коваленко, О.В. Коломійцев, Г.А. Левагін // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2010. – №2(22). – С. 211-215.
8. Kutsenko V.V. Parameters numerical values of errors distribution law in coordinate measuring process at the difference-distance measuring passive location method / V.V. Kutsenko, S.P. Kovalenko, D.D. Dobrowolski // *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*. – 2017. – №1 (26). – Pp. 82-84. – DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.26.17>.
9. Метод виключення зайвої та хибної інформації в алгоритмах управління на ПУ ППО СВ / С.П. Коваленко, В.В. Куценко, С.О. Кравченко // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2019. – №1(57). – С. 20-26.
10. Аналіз застосування угруповання повітряно-космічних сил Російської Федерації у Сирійській Арабській Республіці / Корсунов С.І., Коваленко С.П., Лезік О.В., Галкін Ю.О., Оборонов М.І., Оборонов Ю.М. // *36. наук. пр. Харківського національного університету Повітряних Сил*. – Вип. № 4(66). – 2020. – С. 7-18.
11. Kriukov O. Modeling of the process of the shot based on the numerical solution of the equations of internal ballistics / O. Kriukov, R. Melnikov, O. Bilenko at el. // *Applied physics. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 1/5 (97). – 2019. – Pp. 40-46. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155357>.
12. Теорія і практика боротьби з малорозмірними низьколітніми цілями (оцінка можливостей, тенденції розвитку засобів протиповітряної оборони) / І.С. Романченко, О.М. Загорка, С.Г. Бутенко, О.В. Дейнега. – Житомир: “Полісся”, 2011. – 344 с.
13. Ярош С.П. Аналіз тактики бойового застосування крилатих ракет при нанесенні ударів по важливим державним об'єктам та угрупованням військ / С.П. Ярош, О.В. Рогуля // *36. наук. пр. Харківського національного університету Повітряних Сил*. – 2019. – № 3(61). – С. 35-44. – DOI: <https://doi.org/10.30748/zhups.2019.61.06>.
14. Zhuravlev O. Method for determining coefficient power error of front resistance missile by means station outwardly trajectory measurements / O. Zhuravlev, O. Kolomyitsev, S. Herasimov // *Scientific Works of Kharkiv National University of the Air Force*. – 2017. – Вип. 3 (52). – С. 72-76.

REFERENCES

1. Tkachenko, V.I., Ryapolov, Ye.I., Smirnov, E.B. at el. (2016), *Boiove zastovuvannia vysokotochnykh zasobiv porazhennia i osoblyvosti borotby z nymy*, [Fighting the use of high-precision means of damage and the peculiarities of combating them], Kharkiv, 272 p.
2. Horodnov, V.P., Drobakha, H.A., Yermoshyn, M.O. (2004), *Modeliuvannia y otsinka efektyvnosti boiovykh dii viisk (syl) protypovitrianoi oborony: teoriia, praktyka, istoriia rozvytku: monohrafiia* [Modeling and evaluation of the effectiveness of combat operations of forces (forces) of air defense: theory, practice, history of ro-flight], KhMU, Kharkov, 410 p.
3. Kovalenko, S.P., Tsvihun, V.M., Konyeva, I.V., Leushyn, S.H. (2004), “Metod avtomatyzovanoi obrobky informatsii na PU PPO mekhanizovanoi (tankovoi) bryhady pry paralelnykh ta poslidovnykh potokakh informatsii” [The method of automated information processing on the PU of an air defense mechanized (tank) brigade with parallel and successive streams of information], *Information Processing Systems*, №7 (35), pp. 71-76.
4. Yarosh, S.P., Ryabukha, B.M., Solomonovych, P.A. (2020), “Substantiation of the organization of anti-aircraft missile and artillery cover of groups of troops with the use of interspecific mobile fire units of air defense”, *Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, № 2 (39), pp. 77-82, DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.39.09>.
5. Drobakha, H.A., Henov, B.A. and Zubrytskyi, H.M. (2014), “Vzaiemodiia taktyko-vohnevykh pidrozdiliv zenitnykh raketnykh viisk ta protypovitrianoi oborony sukhoputnykh viisk pry vyryshenni zavdan protypovitrianoi oborony” [Interaction of tactical-firing units of anti-aircraft missile troops and air defense of ground forces in solving the tasks of air defense], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 1(14), pp. 90-93.
6. Borisenko, M.V., Herasimov, S.V., Kostenko, O.I., Makarchuk, D.V. (2018), “Development of optimum navigation information processing algorithm”, *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, 3(32), pp. 38-44, DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2018.32.06>.
7. Kovalenko, S.P., Kolomyitsev, O.V., Levahin, H.A (2010), “Efektyvnyi rozpodil tsilei mizh pidrozdilamy PPO SV – pokaznyk vidverneno zbitku viiskam” [Effective distribution of goals between the units of Air Defense Ground Forces – an indicator of the deflected damage to troops], *Systems of Arms and Military Equipment*, №2 (22), pp. 211-215.
8. Kutsenko, V.V., Kovalenko, S.P., Dobrowolski, D.D. (2017), “Parameters numerical values of errors distribution law in coordinate measuring process at the difference-distance measuring passive location method”, *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, №1 (26), pp. 82-84, DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.26.17>.
9. Kovalenko, S.P., Куценко, V.V., Kravchenko, C.O. (2019), “The method of excluding redundant and erroneous information in the control algorithms on the PU PPO”, *Weapons systems and military equipment*, №1 (57), pp. 20-26.
10. Korsunov, S.I., Kovalenko, S.P., Lezik, O.V. at el. (2020), “Analysis of the application of the grouping of air and space forces of the Russian Federation in the Syrian Arab Republic”, *Scientific Works of Kharkiv National University of the Air Force*, № 4 (66), pp. 7-18.
11. Kriukov, O., Melnikov, R., Bilenko, O. at el. (2019), “Modeling of the process of the shot based on the numerical solution of the equations of internal ballistics”, *Applied physics. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/5 (97), pp. 40-46, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155357>.
12. Romanchenko, I.S., Zagorka, O.M., Butenko, S.G. and Deignega, O.V. (2011), *Teoriya i praktyka borotby z malorozmirnyimi nyzkolitnymi ciljamy (ocinka mozhlyvostej, tendenciji rozvytku zasobiv protypovitrianoi oborony): monograph* [Theory and practice of combating small-scale targets (assessment of capabilities, trends in the development of air defense)], Polissya, Zhytomyr, 344 p.
13. Yarosh, S.P., Rogulya, O.V. (2019), “Analyz taktyky boyovogo zastovuvnnya krylatykh raket pri nanesenni udariv po vazhlyvym derzhavnym ob'ektam” [Analysis of the tactics of military use of cruise missiles in striking important state targets and groups of troops], *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, No. 3(61), pp. 35-44. DOI: <https://doi.org/10.30748/zhups.2019.61.06>.

14. Zhuravlev, O., Kolomytsev, O., Herasimov, S. (2017), "Method for determining coefficient power error of front resistance missile by means station outwardly trajectory measurements", *Scientific Works of Kharkiv National University of the Air Force*, 3 (52), pp. 72-76.

Received (Надійшла) 26.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.04.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

- Коваленко Сергій Петрович** – кандидат військових наук, доцент, Національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Serhii Kovalenko – Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Serhii_Kovalenko@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5461-0125>.
- Герасимов Сергій Вікторович** – доктор технічних наук, професор, Національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Sergey Herasimov – Doctor of Technical Science, Professor, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: sergeyg@i.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1810-0387>.
- Волков Андрій Федорович** – начальник кафедри, Національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Andriy Volkov – Chief of the Department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Andriy_Volkov@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4529-261X>.
- Корсунов Сергій Іванович** – старший викладач, Національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Serhii Korsunov – Senior Instructor, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Serhii_Korsunov@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5370-1375>.
- Оборонов Микола Іванович** – старший викладач, Національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Mykola Oboronov – Senior Instructor, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Mykola_Oboronov@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9769-4568>.

Модель оценки эффективности подразделений противовоздушной обороны

С. П. Коваленко, С. В. Герасимов, А. Ф. Волков, С. И. Корсунов, М. И. Оборонов

Аннотация. Актуальным вопросом современных локальных конфликтов является обоснование возможности подразделений противовоздушной обороны выполнять свои непосредственные задачи по прикрытию с воздуха действий наземных сил. Особенно актуально решение этого вопроса в локальных конфликтах, когда пространство, на котором необходимо выполнять поставленную задачу, растянуто по ширине и глубине. **Цель статьи** - разработка модели оценки эффективности прикрытия действия наземных сил подразделениями ПВО в новых позиционных районах, изменились в размерах по ширине и в глубину. **Результат.** В статье предлагается модель, которая позволяет оценивать эффективность прикрытия вооружения и военной техники и инфраструктуры наземных сил подразделениями противовоздушной обороны. **Выводы.** Разработанная модель поможет командиру подразделения противовоздушной обороны оценивать варианты своей структуры, выбирать из них рациональные, с лучшей эффективностью прикрытия и помогает ему принять правильное решение на отражение ударов с воздуха. Предложенная модель позволяет оценивать эффективность прикрытия наземных сил при различных входных данных и способность подразделений противовоздушной обороны прикрыть наземные силы в зависимости от местности и действий противника.

Ключевые слова: модель; расчет эффективности; локальные конфликты; противовоздушная оборона; граф возможных состояний; воздушное пространство.

Model for assessing the efficiency of departments anti-air defense

Serhii Kovalenko, Sergey Herasimov, Andriy Volkov, Serhii Korsunov, Mykola Oboronov

Abstract. An urgent issue of modern local conflicts is the substantiation of the ability of air defense units to carry out their immediate tasks of providing air cover for ground forces. The solution to this issue is especially relevant in local conflicts, when the space in which it is necessary to perform the assigned task is stretched in width and depth. **The purpose of the article** is to develop a model for evaluating the effectiveness of ground forces cover by air defense units in new positional areas, which have changed in size in width and depth. The article proposes a model that makes it possible to assess the effectiveness of covering weapons and military equipment and infrastructure of ground forces by air defense units. The model was developed using the theory of probability. **Conclusions.** The proposed model involves the choice of a typical composition of internal and external sources of radar information, the direction of data exchange, the composition of the tasks of data processing, the formation of recommendations on the composition of the air defense team and their management. The developed model helps the commander of the air defense unit to evaluate the options for his structure, choose rational ones, with the best cover efficiency, and helps him make the right decision to repel air strikes. The model is proposed to be used in decision-making systems to help the commander make the right decision to cover ground units from the air. The proposed model will also be effective in automated decision-making systems.

Keywords: model; calculation of efficiency; local conflicts; air defense; graph of possible states; airspace.

В. Б. Кононов, О. А. Кононова, Ю. Д. Мусаїрова

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

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ АНАЛОГІЙ ПРИ ПОБУДОВІ ТА РОЗРАХУНКУ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ КРУТИЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ВАЛОПРОВОДУ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Анотація. Мета статті – обґрунтування можливості використання електромеханічних аналогій при побудові та розрахунку параметрів імітаційної моделі процесу крутильних коливань валопроводу двигуна внутрішнього згоряння, яка дозволить переходити від механічних моделей валопроводів до їх електричних аналогів. **Результати дослідження.** В статті з'ясовується зв'язок між явищами, що відбуваються в механічних та електричних системах, встановлюються механічні та електричні аналоги, а саме зусилля розглядається як електрорушійна сила або напруга, швидкість як струм, момент інерції як індуктивність, податливість пружини як ємність, коефіцієнт тертя як електричний опір, а кінематична схема валопроводу представляється в вигляді схеми реактивного двополосника, параметри якого визначаються в ході аналітичних розрахунків кінематичної схеми пружної системи. Введено поняття динамічної жорсткості яке аналогічно поняттю реактивного опору двополосника. Наводяться вихідні дані для розрахунку лінійної системи, в якому прийнято, що податливість амортизатора дорівнює нулю. **Висновки.** За результатами проведених аналогій були отримані параметри імітаційної моделі. Проведений розрахунок пружної системи з використанням методу електромеханічних аналогій дозволив побудувати імітаційну модель валопроводу двигуна внутрішнього згоряння.

Ключові слова: модель; електромеханічні аналогії; крутильні коливання; реактивний двополосник.

Вступ

Постановка проблеми. Явища, що мають місце в реальних процесах, які відбуваються в різноманітних пристроях і їх елементах, як правило, досліджуються з використанням законів фізики. При цьому під час проведення досліджень використовуються відповідні системи рівнянь, які при вивченні перехідних процесів описуються диференціальними рівняннями. Виходячи з єдності рівнянь, які відповідають деяким двом явищам, що відбуваються в різних середовищах, наприклад, в електричному колі і в механічній системі, можливо встановити аналогію між цими явищами і суттєво спростити дослідження механічної системи, замінюючи цю систему електричним колом. Слід підкреслити, що виконання електричного кола більш компактне, вимірювання в цьому колі більш точні та прості. Тому з'ясуємо, як можливо використати основні положення електромеханічної аналогії для побудови імітаційної моделі процесу крутильних коливань двигуна внутрішнього згоряння.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [1-7, 10-13] наводяться теоретичні і практичні результати, які отримані іншими авторами за даним напрямом. Разом з тим, в даних роботах не обґрунтована можливість використання електромеханічних аналогій для дослідження процесу крутильних коливань.

Мета статті – обґрунтування можливості використання електромеханічних аналогій при побудові та розрахунку параметрів імітаційної моделі процесу крутильних коливань валопроводу двигуна внутрішнього згоряння, яка дозволить переходити від механічних моделей валопроводів до їх електричних аналогів.

Виклад основного матеріалу

В статті обґрунтовується метод дослідження процесу крутильних коливань заснований на вико-

ристанні імітаційної моделі цього процесу. Метод заснований на використанні, при побудові моделі, явища електромеханічної аналогії. Відповідно до методу електромеханічних аналогій [8-9] задане зовнішнє зусилля розглядається як джерело сили – в електричному колі як електрорушійна сила або напруга, а швидкість, яка задана, як джерело швидкості або джерело струму чи струм.

Роль пасивних елементів в механічних колах виконують маси, моменти інерції, пружини та механічні демпфуючі опори. Оскільки момент інерції представляє собою коефіцієнт пропорційності між моментом та лінійним або кутовим прискоренням його слід в електричному колі вважати індуктивністю. Пружина виконує роль пасивного елемента, в якому накопичується потенційна енергія, електричний аналог якої є електрична енергія, а податливість пружини, обернено пропорційна її жорсткості, де ємність в електричному колі пропорційна податливості в механічному колі. Тертя, а саме коефіцієнт тертя, пропорційний активному опору в механічному колі, це електричний опір. При побудові імітаційної моделі процесу крутильних коливань, будемо шукати аналог динамічної жорсткості пружної системи валопроводу, кінематична схема якого включає ділянки валу та махові маси.

За результатами проведеної аналогії з метою підтвердження існуючої математичної моделі доцільно запропонувати імітаційну модель процесу крутильних коливань валопроводу дизель-генератора АСДГ-500ППТ у складі дизеля М-619 та генератора Р-504, оснащеного шинно-карданною муфтою. Визначимо основні характеристики агрегату:

- потужність: $N = 500$ кВт;
- кількість обертів: $n = 150$ об/хв.;
- кількість циліндрів: $z = 12$;
- кількість тактів в циліндрі: $m = 4$;
- кут розвалу між блоками: $\gamma = 60^\circ$;

Порівнюючи співвідношення (6), (7) та (7), (8) легко побачити, що існує певна електромеханічна аналогія, слідуючи якій динамічну жорсткість пружної системи валопроводу можливо свідомо представити її електричним аналогом, а саме реактивним опором двополосника, а пружну систему валопроводу представити електричною схемою реактивного двополосника. В схемі на рис. 2 першим елементом схеми елементом $Z_1 = pL_1$ є індуктивність, елементом $Y_2 = 1/pC_2$ є ємність. Дивлячись на співвідношення (7), можливо вважати, $J = L_m$ є ні чим іншим ніж електромеханічною індуктивністю, а вираз $1/C = C_m$ відповідає відповідно електромеханічній ємності, причому індуктивність з'єднані послідовно, а ємності паралельно. Дійсно, виходячи з елементарної схеми двополосника у якого послідовно з'єднані елементи L_1 та C_2 , маємо що $Z = p^2L_1 + 1/C_2$, що відповідає виразу для динамічної жорсткості n -масової системи,

для якої $C_0 = Jp^2 + C$. Зроблений висновок дозволяє запропонувати наступну схему імітаційної моделі пружної системи валопроводу (наведена на рис. 3). Значення індуктивностей та ємностей Y_2, Y_4, Y_6 для імітаційної моделі, схема якої наведена на рис. 3, наведені в табл. 2.

Результатом застосування імітаційної моделі є спрощення процесу аналізу процесу крутильних коливань, підвищення точності результатів оцінки технічного стану електроагрегата за рахунок врахування впливу крутильних коливань на результати визначення значень ступеня нерівномірності частоти, й спрощення прийняття відповідних конструктивних рішень, втілення яких дозволить уникнути наслідків небезпечних резонансів. Електричне імітаційне моделювання механічної системи, крім того, суттєво зменшить грошові витрати і спростить отримання бажаних результатів при налагодженні системи.

Таблиця 2 – Параметри імітаційної моделі

L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8
0,12 Гн	0,031 Гн	0,031 Гн	0,031 Гн	0,031 Гн	0,031 Гн	0,031 Гн	0,012 Гн
L_9	L_{10}	L_{11}	L_{12}	L_{13}	L_{14}	L_{15}	
0,3 Гн	0,027 Гн	0,155 Гн	0,168 Гн	2,112 Гн	11,3 Гн	13,04 Гн	
C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
3,3 мкФ	0,037 мкФ	0,037 мкФ	0,037 мкФ	0,037 мкФ	0,037 мкФ	0,029 мкФ	0
C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}		
0,032 мкФ	0,041 мкФ	1,16 мкФ	0,015 мкФ	0,001 мкФ	0,002 мкФ		

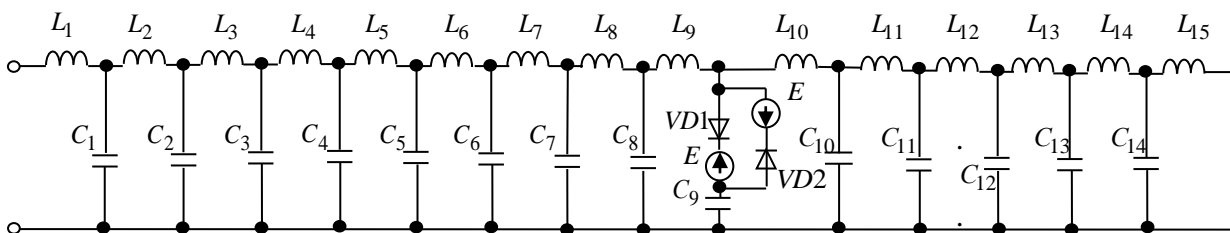


Рис. 3. Імітаційна модель валопроводу двигуна (Fig. 3. Simulation model of the motor shaft)

Висновки

1. Використання методу електромеханічних аналогій для побудови імітаційної моделі крутильних коливань двигуна внутрішнього згоряння спрощує процес аналізу процесу крутильних коливань, підвищує точність результатів оцінки технічного стану електроагрегата за рахунок врахування впливу крутильних коливань на результати визначення значень ступеня нерівномірності частоти.

2. Відповідно до методу електромеханічних аналогій кінематична схема валопроводу представляється в вигляді схеми реактивного двополосника, зусилля розглядається як електрорушійна сила або напруга, швидкість як струм, момент інерції як індуктивність, податливість пружини як ємність, коефіцієнт тертя як електричний опір.

3. Проведений розрахунок пружної системи з використанням методу електромеханічних аналогій дозволив побудувати імітаційну модель валопроводу двигуна внутрішнього згоряння.

Список літератури

1. Вихерт П. М. Конструкция и расчет автотракторных двигателей. Москва: Машиностроение, 1964. 552 с.
2. Кононов Б. Т., Бондаренко О. І. Вибір показника для оцінювання технічного стану дизель-генератора. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2017. № 3(52). С. 113-117.
3. Кононов Б. Т., Мусаїрова Ю. Д., Нечаус А. О. Методика врахування крутильних коливань при визначенні ступеня нерівномірності частоти обертання валу дизель-генератора. *Системи озброєння і військова техніка*. 2018. № 4 (56). С. 100-108.
4. Мусаїрова Ю. Д. Визначення амплітуд та частот крутильних коливань валопроводу дизель-генератора, в якому використовуються пристрої для гасіння коливань. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2019. № 2 (60). С. 140-152.
5. Белов П.М. Двигатели армейских машин. Часть 2. Конструкция и расчет. М.: Воениздат, 1972. 561 с.
6. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М: Ленанд, 2017. 416 с.
7. Саблиев Д. М. Диагностика неисправностей автомобиля. М.: Феникс, 2009. 256 с.

REFERENCES

1. Vihert, P. M. (1964), "Design and calculation of automotive engines", *Mechanical engineering*, Moscow, 552 p.
2. Kononov, B.T. and Bondarenko, O.I. (2017), "Choice of index for estimation of the technical state dyzel-generator", *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, Vol. 3(52), pp. 113-117.
3. Kononov, B.T., Musairova, Yu.D. and Nechaus, A.O. (2018), "Technique of accounting of torsional fluctuations when determining degree of unevenness of frequency of rotation of the shaft of the diesel generator", *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 4(56), pp. 100-107.
4. Musairova, Yu.D. (2019), "Determination of the amplitudes and frequencies of the torque vibrations of the diesel-generator barket condition, which are using the devices of vibration movements", *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, Vol. 2(60), pp. 140-152.
5. Below, P. M. (1972), *Engines of army vehicles. Part 2. Design and calculation*, Moscow, 561 p.
6. Biderman, V.L. (2017), *Theory of mechanical vibrations*, Lenand, Moscow, 416 p.
7. Sabliyev, D.M., (2009), *Diagnostics of malfunctions of the car*, Phoenix, Moscow, 256 p.

Received (Надійшла) 28.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.04.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

- Кононов Володимир Борисович** – доктор технічних наук, професор, начальник кафедри, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Volodymyr Kononov – Doctor of Technical Science, Professor, Head of Department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: Volodymyr.Kononov@i.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9946-5056>.
- Кононова Олена Анатоліївна** – науковий співробітник, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Olena Kononova – Research Associate, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: Olena.Kononova@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6251-9495>.
- Мусаїрова Юлія Дмитрівна** – ад'юнкта, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Yulia Musairova – adjunct, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: musairova2015@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7188-2085>.

Использование электромеханических аналогий при построении и расчете имитационной модели процесса крутильных колебаний валопровода двигателя внутреннего сгорания

В. Б. Кононов, О. А. Кононова, Ю. Д. Мусаїрова

Аннотация. Цель статьи - обоснование возможности использования электромеханических аналогий при построении и расчете параметров имитационной модели процесса крутильных колебаний валопровода двигателя внутреннего сгорания, которая позволит переходить от механических моделей валопроводов к их электрическим аналогам. **Результаты исследования.** В статье выясняется связь между явлениями, происходящими в механических и электрических системах, устанавливаются механические и электрические аналоги, а именно усилие рассматривается как электродвижущая сила или напряжение, скорость как ток, момент инерции как индуктивность, податливость пружины как емкость, коэффициент трения как электрическое сопротивление, а кинематическая схема валопровода представляется в виде схемы реактивного двухполюсника, параметры которого определяются в ходе аналитических расчетов кинематической схемы упругой системы. Введено понятие динамической жесткости, которое аналогично понятию реактивного сопротивления двухполюсника. Приводятся исходные данные для расчета линейной системы, в котором принято, что податливость амортизатора равна нулю. **Выводы.** По результатам проведенных аналогий были получены параметры имитационной модели. Проведенный расчет упругой системы с использованием метода электромеханических аналогий позволил построить имитационную модель валопровода двигателя внутреннего сгорания.

Ключевые слова: модель; электромеханические аналогии; крутильные колебания; реактивный двухполюсник.

Use of electromechanical analogies in the construction and calculation of a simulation model of the process of torsional oscillations of the shaft line of an internal combustion engine

Volodymyr Kononov, Olena Kononova, Yulia Musairova

Abstract. The purpose of the article is to substantiate the possibility of using electromechanical analogies in the construction and calculation of parameters of the simulation model of the process of torsional oscillations of the internal combustion engine shaft, which will allow to move from mechanical models of shafts to their electrical counterparts. **Results of the research.** The article clarifies the relationship between phenomena occurring in mechanical and electrical systems, mechanical and electrical analogues are established, namely force is considered as electromotive force or voltage, velocity as current, moment of inertia as inductance, spring flexibility as capacitance, coefficient friction as electrical resistance, and the kinematic scheme of the shaft line is presented in the form of a diagram of a reactive bipolar, the parameters of which are determined during analytical calculations of the kinematic scheme of the elastic system. The concept of dynamic stiffness is introduced, which is similar to the concept of reactive resistance of a bipolar. The initial data for the calculation of a linear system in which it is assumed that the pliability of the shock absorber is zero. **Conclusions.** According to the results of the analogies, the parameters of the simulation model were obtained. The calculation of the elastic system using the method of electromechanical analogies allowed to build a simulation model of the shaft line of an internal combustion engine.

Keywords: model; electromechanical analogies; torsional oscillations; reactive bipolar.

Л. О. Левченко

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВИХ ПОШИРЕНЬ МАГНІТНИХ ПОЛІВ НАДНИЗЬКОЇ ЧАСТОТИ МНОЖИННИХ ДЖЕРЕЛ

Анотація. У роботі показано, що в умовах ущільнення розташування електротехнічного обладнання у приміщеннях, будівлях та на територіях для забезпечення нормативних рівнів електромагнітної сумісності персоналу і населення доцільно здійснювати попереднє моделювання поширення електромагнітних полів. Враховуючи незначне екранування магнітного поля корпусами обладнання моделювання доцільно здійснювати за магнітною складовою електромагнітного поля. Визначено математичне співвідношення щодо поширення магнітного поля окремих джерел з урахуванням їх дипольної моделі. Моделювання здійснювалося для джерел дипольного та дипольно-квадрупольного типу. З використанням пакету Matlab надано тривимірні моделі джерел з поширенням дипольної, квадрупольної та дипольно-квадрупольної гармонік поля. Розроблено прикладне програмне забезпечення у середовищі C з використанням бази даних SQL-сервер і здійснено моделювання поширення магнітного поля багатьох джерел у визначеній площині. Отриманий результат свідчить, що навіть для електротехнічного обладнання, що перебуває у експлуатації, визначити наведені ізолінії напруженості магнітного поля експериментальним шляхом дуже складно. На стадіях проектування розміщення обладнання моделювання є єдиним інструментарієм прогнозування електромагнітної обстановки, яка визначає електромагнітну сумісність технічних засобів і електромагнітну безпеку персоналу і населення.

Ключові слова: моделювання; електромагнітне поле; електромагнітна сумісність; електромагнітна безпека.

Вступ

В умовах збільшення кількості і номенклатури електротехнічного обладнання, розміщеного в окремих приміщеннях та визначених територіях, підвищення його потужностей постає проблема раціоналізації або оптимізації взаємного розташування обладнання, яке забезпечить максимальні ступені електромагнітної сумісності технічних засобів та безпеки персоналу і населення.

Найбільш надійним методом визначення електромагнітної обстановки є натурні вимірювання у реальних умовах експлуатації обладнання. Але це можливо, наприклад, під час модернізації існуючого обладнання або його окремих одиниць. Навіть за наявності аналогічних пристроїв, за його великої кількості в умовах експлуатації передбачити напруженості електричних та магнітних полів в окремих зонах складно і вимагає дуже великої кількості вимірювань. Найефективнішим методом оцінювання електромагнітної обстановки на стадіях проектування розміщення обладнання та первинного монтажу є моделювання поширення полів за тих чи інших взаємних розташуваннях технічних засобів. Це надасть можливість визначити найбільш прийнятні схеми монтажу обладнання, які мінімізують його взаємний вплив та несприятливий вплив на персонал і населення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Більшість робіт з моделювання поширення електричних, магнітних та електромагнітних полів мають прикладну спрямованість. Щодо електромагнітних полів наднизьких частот (промислової та її гармонік), то їх переважна кількість стосується проектування електротехнічного обладнання – підвищення його ефективності (зниження втрат) [1, 2].

Частина досліджень розглядає зовнішні поля технічних засобів. Зокрема, у [3] наведено розрахунки й результати експериментальної перевірки просторово-

го розподілу магнітного поля чотириполосної електричної машини. Показано, що такі об'єкти є джерелами дипольно-квадрупольного поля. Експериментально підтверджено прийнятну збіжність модельованих поширень електричного поля промислової частоти навколо повітряних та кабельних високовольтних ліній електропередачі [4, 5]. Розподілу полів кількох джерел присвячено поодинокі роботи [6, 7], які стосуються високочастотних джерел. Значною мірою це обумовлено їх однотипністю і однаковими законами розподілу випромінювань. У ґрунтовному дослідженні [8] показано, що більшість джерел низькочастотного магнітного поля можна розглядати як системи магнітних диполів. Врахування просторових гармонік дозволяє розрахувати напруженості полів з мінімальними похибками (обираючи кількість гармонік, що враховуються). Але у багатьох випадках для оцінювання електромагнітної обстановки на великих площах висока точність не є критичною. Спрощений розрахунковий апарат, наведений у [9], дозволяє на прийнятному рівні визначити як розподіл напруженостей електричного та магнітного поля, так і контури зон перевищення гранично допустимих рівнів.

Постановка завдання. Мета роботи – реалізація методології моделювання поширення електромагнітного поля багатьох джерел та візуалізація результатів моделювання.

Виклад основного матеріалу

Згідно чинним міжнародним та національним нормативам рівні електромагнітних полів частотами до 300 МГц визначаються за напруженостями їх електричної та магнітної складових. Одночасне визначення цих параметрів, принаймні локалізованих у просторі технічних пристроїв (електродвигунів, генераторів, трансформаторів, розподільчих пунктів тощо) недоцільне. Електрична складова повністю або частково екранується металевими корпусами або об-

шивками обладнання. В той же час екранування магнітної складової – мінімальне. Тому моделювання поширення електромагнітних полів низьких частот доцільно здійснювати за магнітними складовими. До того ж, згідно останнім дослідженням, магнітне поле техногенного походження має більш несприятливий вплив на біологічні об'єкти, ніж електричне.

Прикладне програмне забезпечення створюється на основі математичних функцій, які описують поширення магнітного поля. Для здійснення моделювання зручність дипольної моделі магнітного поля джерела полягає у тому, що можливо розглянути диполі різної орієнтації у одному джерелі та різноспрямовані диполі, які характеризують поле одного джерела. Для розроблення концептуальної моделі поширення магнітних полів багатьох джерел та інтегральної напруженості магнітного поля у будь-якій точці площі, яка розглядається, можна обрати довільні магнітні моменти диполів. У відповідності до чинних нормативів рівні електромагнітних полів як у приміщеннях, так і на територіях нормуються на висоті 1,8 м над поверхнею підлоги або землі (крім випадків, коли визначаються зони обмеження забудови за умови впливу джерел електромагнітних випромінювань таких як радіотехнічні об'єкти цивільної авіації). Тому достатньо розглянути радіальну складову магнітного поля кожного диполя

$$H_r = m \cdot \cos \theta / (2\pi \cdot R^3)$$

та кутову складову $H_\theta = m \cdot \sin \theta / (4\pi \cdot R^3)$, де m – магнітний момент диполя, R – відстань від центра диполя до точки визначення напруженості магнітного поля, θ – кут між вектором диполя на напрямком до точки визначення поля, та отримати пласку мапу, що показує напруженість магнітного поля у кожній точці визначеної площини: від одного джерела

$$H = \sqrt{H_R^2 + H_\theta^2}, \text{ та від усіх джерел:}$$

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + \dots + H_n^2}.$$

За цільного розташування джерел з більш складною структурою поля (наприклад, багатополосні електричні машини) похибки розрахунків необхідно знижувати. У цьому випадку у модель і програмне забезпечення потрібно закладати дещо інше співвідношення з урахуванням принаймні двох просторових гармонік (дипольної і квадрупольної). Розрахунки виконуються для трьох складових магнітного поля у сферичних координатах (H_r , H_θ , H_ϕ) [7].

Моделювання поширення гармонік з різними закономірностями їх розповсюдження у просторі здійснюється з використанням пакету Matlab. Наприклад, найбільш поширені електричні машини – чотириполосні з дипольно-квадрупольним магнітним полем. Поширення дипольної, квадрупольної та дипольно-квадрупольної гармонік наведено на рис. 1.

Для розрахунків необхідних для отримання розподілу поля у площині визначається орієнтація джерела поля з відповідними характеристиками у обраних ко-

ординатах. Для моделювання поширення магнітного поля у визначеній площині було розроблено прикладне програмне забезпечення у середовищі C, при цьому використовувалося управління базою даних SQL-сервер. Результати моделювання наведено на рис. 2.

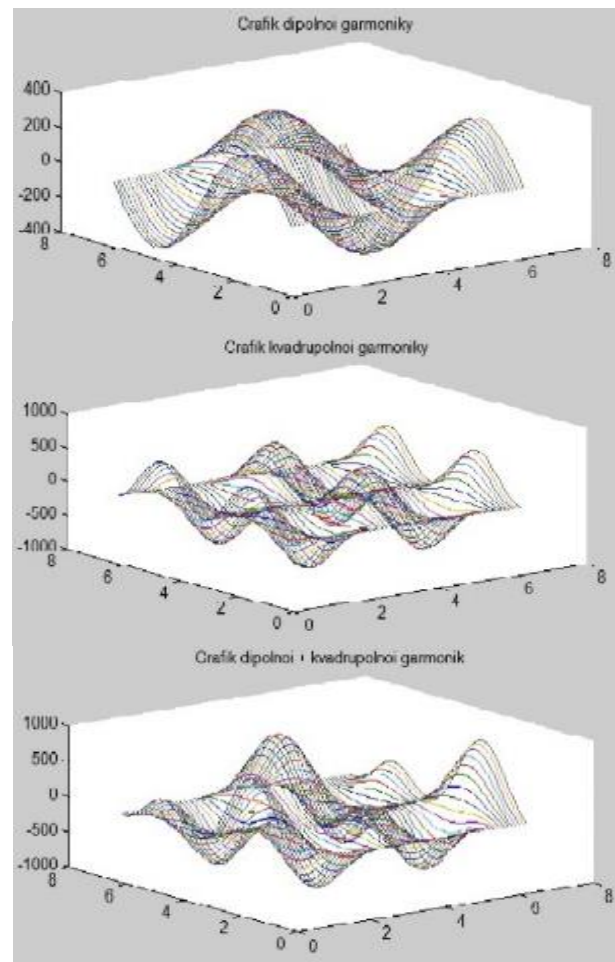


Рис. 1. Розподіл напруженості магнітного поля дипольної, квадрупольної та дипольно-квадрупольної гармонік, напруженість поля H , А/м на осі Z

(Fig. 1. Distribution of magnetic field strength of dipole, quadrupole and dipole-quadrupole harmonics)

Очевидно, що визначити конфігурації наведених на рис. 2 ізоліній, навіть для обладнання, яку перебуває у експлуатації, експериментальним шляхом практично неможливо. Наявність моделі дозволяє провести її верифікацію у найбільш критичних точках методом натурних вимірювань та внести необхідні корективи з огляду на те, що завжди існують чинники, які важко або неможливо врахувати при реалізації моделювання. У першу чергу це стосується вихідних даних щодо фактичних технічних характеристик джерел електромагнітних полів.

Висновки

1. Моделювання поширення електричних, магнітних та електромагнітних полів багатьох джерел дозволяє оцінити ступені електромагнітної безпеки та електромагнітної сумісності в окремих приміщеннях та на визначених територіях на стадіях проектування розміщення електротехнічного обладнання.

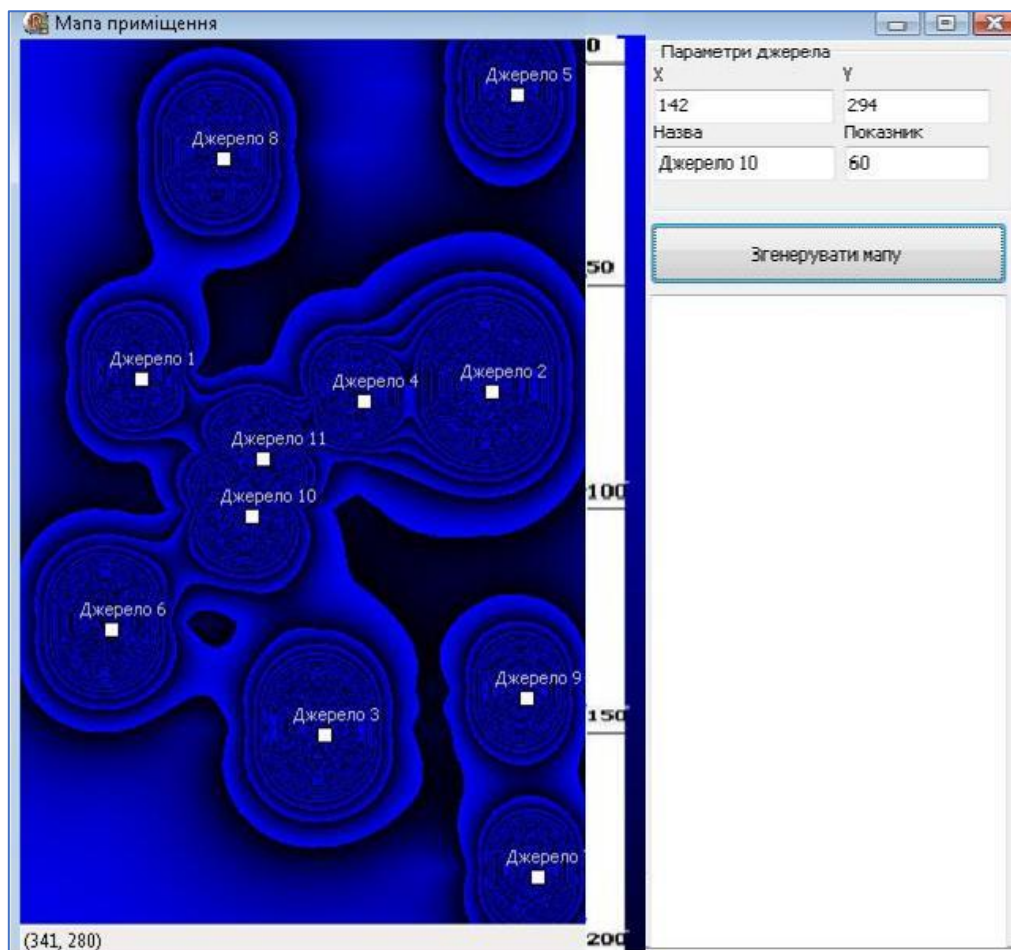


Рис. 2. Моделювання просторового поширення багатьох джерел різної орієнтації. Розміри площини – X, Y (м), шкала індукції магнітного поля – праворуч (мкТл)
(Fig. 2. Modeling of spatial distribution of many sources of different orientation)

2. Для достовірності отриманих моделей необхідним є застосування коректних функцій щодо просторових поширень окремих складових поля з прийнятними спрощеннями й припущеннями.

3. Для локалізованих у просторі технічних засобів здійснення моделювання поширення полів над-

низьких частот слід реалізовувати, виходячи з того факту, що поля більшості з них можна характеризувати як поля комбінації магнітних диполів. Отримані результати дозволяють скоротити час і вартість проектних робіт з розміщення електротехнічного обладнання у будівлях та територіях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Розов В. Ю. Исследование магнитного поля трехфазных кабельных линий из одножильных кабелей при двустороннем заземлении их экранов. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2015. № 4. С. 56–61.
2. Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств. *Техническая электродинамика*. 2015. № 2. С. 3–15.
3. Левченко Л. О., Сукач С. В., Коновалова О. В. Моделювання просторових розподілів магнітних полів електричних машин для визначення зон безпечного перебування персоналу. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2014. Вип. 6 (89), Ч. 1. С. 27–31.
4. Розов В. Ю., Реуцкий С. У., Пелевин Д. Е. Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока. *Технічна електродинаміка*. 2012. №1. С. 3–9.
5. Пелевин Д. Е. Методы снижения магнитного поля воздушных линий электропередачи за пределами охранных зон. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 5. С. 14–16.
6. Koppel T, Ahonen M, Carlberg M, Hedendahl L.K, Hardell L. Radiofrequency radiation from nearby mobile phone base stations-a case comparison of one low and one high exposure apartment. *Oncol Lett*. 2019. № 18(5). PP. 5383–5391. DOI: <https://doi.org/10.3892/ol.2019.10899>.
7. Мордачев В. И., Свистунов А. С. Необходимый и достаточный уровень мощности электромагнитного излучения базовых станций сети GSM. *Доклады БелГУ информатики и радиоэлектроники*. 2013. № 7. С. 44–50.
8. Гетьман А.В. Аналіз та синтез структури магнітного поля технічних об'єктів на основі просторових гармонік: дис. ... д-ра техн. наук, 05.09.05. Харків, 2019. 316 с.
9. Ходаковський О. В., Левченко Л. О., Колумбет В. П., Козачук А. Д., Кужавський Д. С. Розрахунковий апарат моделювання поширення електромагнітних полів різноорієнтованих джерел. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Т. 5. № 1. С. 34–38. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.04>.

REFERENCES

1. Rozov, V. Yu. (2015), "Investigation of the magnetic field of three-phase cable lines from single-core cables with double-sided grounding of their screens", *Electrotechnics and Electromechanics*, No. 4, pp. 56–61.
2. Podoltsev A. D., Kucheryavaya I. N. (2015), "Multiphysical modeling of electrical devices", *Technical electrodynamics*, No. 2, pp. 3–15.
3. Levchenko, L.O., Sukach, S.V. and Konovalova, O.V. (2014), "Modeling of spatial distributions of magnetic fields of electric machines for definition of zones of safe stay of personnel", *Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrogradsky National University*, Is. 6 (89), part 1, pp. 27–31.
4. Rozov V. Yu., Reutskiy S. U., Pelevin D. Ye. et al. (2012), "Research of the magnetic field of high-voltage AC power lines", *Technical electrodynamics*, No. 1, pp. 3-9.
5. Pelevin D.E. (2015), "Methods for reducing the magnetic field of overhead power transmission lines outside the security zones", *Technical electrodynamics*, No. 5. pp. 14-16.
6. Koppel T, Ahonen M, Carlberg M, Hedendahl L.K, Hardell L. (2019), "Radiofrequency radiation from nearby mobile phone base stations-a case comparison of one low and one high exposure apartment", *Oncol Lett*, № 18(5), pp. 5383–5391.
7. Mordachev V. I., Svistunov A. S. (2013), "Necessary and sufficient power level of electromagnetic radiation of base stations of the GSM network", *Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*, No. 7, pp. 44–50.
8. Getman A.V. Analysis and synthesis of the structure of the magnetic field of technical objects on the basis of spacious harmonics: dis. ... dr. tech. sciences, 05.09.05. Kharkiv, 2019. 316 p.
9. Khodakovskiy O.V., Levchenko L.O., Columbet V.P., Kozachuk A.D., Kuzhavskiy D.S. (2021), "Computational apparatus for modeling the propagation of electromagnetic fields of dissimilar sources", *Advanced Information Systems*, Vol. 5., No. 1, pp. 34 – 38, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.04>.

Received (Надійшла) 15.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.04.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Левченко Лариса Олексіївна – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;
Larysa Levchenko – Doctor of Technical Sciences, Associate 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: larlevch@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7227-9472>.

**Моделирование пространственных распространённых магнитных полей
сверхнизкой частоты множественных источников**

Л. А. Левченко

Аннотация. Показано, что в условиях уплотнения расположения электротехнического оборудования в помещениях, зданиях и на территориях для обеспечения нормативных уровней электромагнитной совместимости персонала и населения целесообразно осуществлять предварительное моделирование распространения электромагнитных полей. Учитывая незначительное экранирование магнитного поля корпусами оборудования, целесообразно осуществлять моделирование по магнитной составляющей электромагнитного поля. Определено математическое соотношение распространения магнитного поля отдельных источников с учетом их дипольной модели. Моделирование осуществлялось для источников дипольного и дипольно-квадрупольного типа. С использованием пакета Matlab предоставлены трехмерные модели источников с распространением дипольной, квадрупольной и дипольно-квадрупольной гармоник поля. Разработано прикладное программное обеспечение в среде C с использованием базы данных SQL-сервер и осуществлено моделирование распространения магнитного поля многих источников в определенной плоскости. Полученный результат показывает, что даже для электротехнического оборудования, находящегося в эксплуатации, определить приведенные изолинии напряженности магнитного поля экспериментальным путем очень сложно. На стадиях проектирования размещения оборудования моделирование является единственным инструментарием прогнозирования электромагнитной обстановки, которое определяет электромагнитную совместимость технических средств и электромагнитную безопасность персонала и населения.

Ключевые слова: моделирование; электромагнитное поле; электромагнитная совместимость; электромагнитная безопасность.

Modeling the spatial distribution of magnetic fields of low frequency multiple sources

Larysa Levchenko

Abstract. The work is show that in conditions of dense the location of electrical equipment in the premises, buildings and on territories to ensure the regulatory levels of electromagnetic compatibility of personnel and the population, it is advisable to carry out preliminary modeling of the propagation of electromagnetic fields it is advisable. Considering the insignificant shielding of the magnetic field by the equipment cases, it is advisable to carry out modeling based on the magnetic component of the electromagnetic field. The mathematical ratio of the propagation of the magnetic field of individual sources, taking into account their dipole model, has been determined. The modeling was carried out for sources of the dipole and dipole-quadrupole types. Three-dimensional models of sources with the propagation of dipole, quadrupole and dipole-quadrupole harmonics of the field are provided, using the Matlab package. Application software has been developed in the C environment, using the SQL server database, and modeling of the propagation of the magnetic field of many sources in a certain plane has been carried out. This result is show that even for electrical equipment that operates to determine the reduced magnetic field isolines experimentally very difficult. At the design stages of equipment placement, modeling is the only tool for predicting the electromagnetic environment, which determines the electromagnetic compatibility of technical equipment and the electromagnetic safety of personnel and the public.

Keywords: modeling; electromagnetic field; electromagnetic compatibility; electromagnetic safety.

В. В. Мошаренков¹, С. С. Войтенко²

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

² Державне підприємство «Харківський регіональний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації», Харків, Україна

РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СТАТИЧНОЇ ПОХИБКИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Анотація. Метою статті є подальший розвиток теорії оцінки статичних похибок електромеханічних засобів вимірювальної техніки (ЕмЗВТ) для ефективного їх застосування під час МОБ ВТ та контролі функціонування перед застосуванням. Для цього необхідно послідовне вирішення низки теоретичних і прикладних питань, головним з яких є розробка узагальненої математичної моделі статичної похибки ЕмЗВТ, а потім з подальшим її використанням конкретної оцінки статичних похибок для різних структурних схем побудови ЕмЗВТ. **Результати.** В статті розглядаються прикладні аспекти оцінки статичної похибки електромеханічних засобів вимірювальної техніки визначену через чутливість або статичні коефіцієнти передачі вимірювальних перетворювачів. За результатами аналізу отримана узагальнена математична модель відносної статичної похибки ЕмЗВТ для структурних схем з'єднання вимірювальних перетворювачів (ВП). **Висновки.** Підтверджено за результатами аналізу, можливість застосування узагальненої математичної моделі для оцінки відносної статичної похибки ЕмЗВТ побудованих за різними структурними схемами при їх експлуатації. Використання уточненої статичної похибки надає можливість уточнювати калібрувальну характеристику електромеханічних засобів вимірювальної техніки, що в свою чергу призведе до отримання достовірної інформації про стан військової техніки під час проведення метрологічного обслуговування та безпосередньо при застосуванні.

Ключові слова: військова техніка; електромеханічні вимірювальні прилади; вимірювальний перетворювач; статична похибка; градувальна характеристика; узагальнена математична модель.

Вступ

Військова техніка – сукупність технічних пристроїв та засобів, що призначені для використання у військових цілях. До таких технічних засобів відносять зброю, бойові та небойові машини, прилади, апарати й інші технічні засоби, якими оснащуються військові частини і підрозділи для забезпечення їх бойової та повсякденної діяльності [1].

Основним заходом, що дозволяє підтримувати військову техніку (ВТ) придатною до застосування, є їх технічне обслуговування, важливою і невід'ємною частиною якого є метрологічне обслуговування (МОБ) [2]. Ефективність МОБ ВТ залежить від повноти охоплення контрольованих параметрів ВТ, періодичності і достовірності їх вимірювального контролю [3].

Найбільш поширеними при контролі параметрів в різних системах ВТ є ЕмЗВТ електромагнітної системи, іноді електро- і феродинамічної систем. З усього комплексу нормованих метрологічних характеристик ЕмЗВТ найбільший науковий і практичний інтерес представляють дослідження можливостей і розробка теоретичних основ оцінки статичної похибки для різних структурних схем побудови ЕмЗВТ [4].

Аналіз літератури. У зазначеному напрямку є роботи, в яких розглядаються окремі питання теоретичного і прикладного характеру для вирішення метрологічних вимірювальних задач [5-7]. Найбільш системно і повно ці питання відображені в роботах [6, 7], де запропоновані узагальнена і часткові математичні моделі для оцінювання методичних похибок. Дуже мало уваги приділялось оцінці статичної похибки при експлуатації ЕмЗВТ, що може призвести до отримання недостовірної інформації під час

проведення МОБ ВТ, а це в свою чергу до зниження бойової готовності ВТ.

Метою статті є подальший розвиток теорії оцінки статичних похибок ЕмЗВТ для ефективного їх застосування під час МОБ ВТ та контролі функціонування перед застосуванням. Для цього необхідно послідовне вирішення низки теоретичних і прикладних питань, головним з яких є розробка узагальненої математичної моделі статичної похибки ЕмЗВТ, а потім з подальшим її використанням конкретної оцінки статичних похибок для різних структурних схем побудови ЕмЗВТ.

Основний матеріал

Основною метрологічною характеристикою ЕмЗВТ у статичному режимі вимірювання є *номінальна градувальна характеристика* (ГХ), яку їм приписують при випуску з виробництва [8], слід зазначити, що *розрахункова номінальна ГХ*, яку визначають при проектуванні приладу, відрізняється від *ідеальної* [9]. Під час експлуатації реальна ГХ під впливом різноманітних факторів буде відрізнятися від номінальної, що призводить до інструментальної статичної похибки. Виходячи з цього більш доцільно використовувати термін калібрувальна характеристика (КХ) [6], яка впливає на результат вимірювання [10].

Для оцінки інструментальної статичної похибки скористаємося структурним методом, який ґрунтується на тому, що будь-який ЕмЗВТ можна зобразити відповідною структурною схемою з'єднання ВП (послідовною, паралельною, змішаною). Це дозволяє спочатку провести оцінку статичних похибок ВП, що входять до їх складу, а потім з їх використанням дати оцінку статичної похибки цього приладу.

Отримаємо узагальнену математичну модель статичної похибки ЕмЗВТ, а потім з її використанням знайдемо конкретні оцінки статичних похибок для вказаних вище схем з'єднання ВП.

Зобразимо умовно ЕмЗВТ одним прямокутником, що містить N ВП (рис. 1), де через $Y_i, i=1, N$ позначені вихідні величини цих перетворювачів. Необхідно виразити статичну похибку ЕмЗВТ через статичні похибки ВП, що входять до його складу.

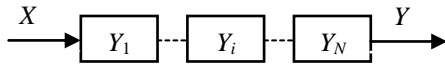


Рис. 1. Умовне позначення ЕмЗВТ
(Fig. 1. Symbol of electromechanical measuring equipment)
(джерело: розроблено авторами)

Для цього цілком справедлива методика оцінки похибки результату опосередкованих вимірювань.

Нехай задана номінальна КХ ЕмЗВТ, якій відповідають відомі номінальні значення вихідних величин Y_{in} вимірювальних перетворювачів:

$$Y_n = f_n(X, Y_{1n}, Y_{2n}, \dots, Y_{in}, \dots, Y_{Nn}). \quad (1)$$

Але через наявність статичних похибок ВП реальні значення їх вихідних величин Y_i будуть відрізнятися від номінальних значень Y_{in} на величину ΔY_i при однаковому вхідному сигналі X , тобто

$$Y_i = Y_{in} + \Delta Y_i. \quad (2)$$

Тоді реальна КХ ЕмЗВТ

$$Y = f(X, Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots, Y_N), \quad (3)$$

або з урахуванням рівності (2)

$$Y = f(X, Y_{1n} + \Delta Y_1, Y_{2n} + \Delta Y_2, \dots, Y_{in} + \Delta Y_i, \dots, Y_{Nn} + \Delta Y_N). \quad (4)$$

Абсолютна статична похибка ЕмЗВТ, обумовлена статичними похибками ВП дорівнює

$$\Delta Y = Y - Y_n. \quad (5)$$

Використовуючи розкладання реальної КХ ЕмЗВТ (4) у ряд Тейлора за малими величинами ΔY_i отримуємо вираз для абсолютної статичної похибки ЕмЗВТ:

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^N \frac{\partial Y}{\partial Y_i} \cdot \Delta Y_i, \quad (6)$$

де часткові похідні $\partial Y / \partial Y_i$ обчислюються для номінальних значень параметрів Y_{in} ВП.

Перейдемо до відносної статичної похибки:

$$\delta Y = \Delta Y / Y. \quad (7)$$

Підставимо в (7) співвідношення (6), отримуємо:

$$\delta Y = \sum_{i=1}^N \frac{\partial Y}{\partial Y_i} \cdot \frac{\Delta Y_i}{Y}. \quad (8)$$

Вираз під знаком суми помножимо та розділимо на Y_i , маємо

$$\delta Y = \sum_{i=1}^N \frac{\partial Y}{\partial Y_i} \cdot \frac{Y_i}{Y} \cdot \frac{\Delta Y_i}{Y_i} \quad \text{або} \quad \delta Y = \sum_{i=1}^N \psi_i \cdot \delta Y_i, \quad (9)$$

де $\delta Y_i = \Delta Y_i / Y_i$ – відносна статична похибка i -го ВП;

$$\psi_i = \frac{\partial Y}{\partial Y_i} \cdot \frac{Y_i}{Y}; \quad (10)$$

– безрозмірний коефіцієнт впливу i -го ВП на відносну статичну похибку ЕмЗВТ.

Формули (9), (10) є узагальненою математичною моделлю відносної статичної похибки ЕмЗВТ. Вони дозволяють оцінити цю похибку за відомими функціями перетворення (або статичними характеристиками) та відносними статичними похибками ВП. Проте такі оцінки є дещо громіздкими. Вони можуть бути спрощені, якщо від функцій перетворення перейти до пов'язаних з ними чутливістю або статичними коефіцієнтами передачі [10].

Для цього запишемо співвідношення для номінальної та реальної чутливостей у вигляді:

$$S = F(S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_N). \quad (11)$$

При цьому будемо позначати як S_{in}, S_i відповідно номінальну та реальну чутливості i -го ВП в складі ЕмЗВТ. Реальна чутливість S_i ВП відрізняється від номінальної чутливості S_{in} на абсолютну статичну похибку ΔS_i і тим самим вносить похибку ΔS_i в номінальну чутливість S_n ЕмЗВТ, тобто $S_i = S_{in} + \Delta S_i, S = S_n + \Delta S$. Абсолютна статична похибка ΔS може бути визначена з використанням розкладу функції (11) в ряд Тейлора до лінійного члена за малими величинами ΔS_i :

$$\Delta S = \sum_{i=1}^N \frac{\partial S}{\partial S_i} \cdot \Delta S_i. \quad (12)$$

З урахуванням цієї рівності перейдемо до відносної статичної похибки:

$$\delta S = \frac{\Delta S}{S} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial S}{\partial S_i} \cdot \frac{\Delta S_i}{S}.$$

Після перетворень маємо

$$\delta S = \sum_{i=1}^N \frac{\partial S}{\partial S_i} \cdot \frac{S_i}{S} \cdot \delta S_i, \quad (13)$$

де $\delta S_i = \Delta S_i / S_i$ – відносна похибка чутливості i -го вимірювального перетворювача.

Найдемо зв'язок між (9) і (13). Для цього розглянемо окремий i -й вимірювальний перетворювач з чутливістю S_i у схемі ЕмЗВТ (рис. 2).

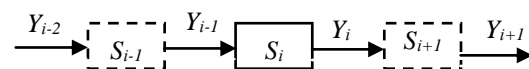


Рис. 2. Умовні позначення для i -го ВП (Fig. 2. Symbols for the i -th connection of the measuring transducer)
(джерело: розроблено авторами)

Нехай функції перетворення ВП лінеаризовані, а

$$S_i = Y_i / Y_{i-1}, \quad (14)$$

де Y_{i-1} , Y_i – відповідно вхідна та вихідна величини i -го ВП. З виразу (14) запишемо

$$Y_i = S_i \cdot Y_{i-1}. \quad (15)$$

Нехай чутливість S_i i -го ВП через його статичну похибку має деякий приріст ΔS_i , за рахунок чого вихідна величина Y_i цього перетворювача отримує певний приріст ΔY_i за тієї самої вхідної величини Y_{i-1} , тобто

$$Y_i + \Delta Y_i = (S_i + \Delta S_i) \cdot Y_{i-1}. \quad (16)$$

Віднімемо від рівності (16) рівність (15):

$$\Delta Y_i = \Delta S_i \cdot Y_{i-1}. \quad (17)$$

Розділимо співвідношення (17) на (15)

$$\Delta Y_i / Y_i = \Delta S_i / S_i \quad \text{або} \quad \delta Y_i = \delta S_i. \quad (18)$$

Аналогічно можна показати, що справедливою є рівність $\delta Y = \delta S$, тому

$$\delta Y = \sum_{i=1}^N \frac{\partial S}{\partial S_i} \cdot \frac{S_i}{S} \cdot \delta Y_i. \quad (19)$$

З порівняння співвідношень (9) і (19) дістаємо

$$\psi_i = \frac{\partial S}{\partial S_i} \cdot \frac{S_i}{S}. \quad (20)$$

Формули (9) і (20) є іншою формою запису узагальненої математичної моделі відносної статичної похибки ЕМЗВТ.

Висновок

За результатами проведеного аналізу отримана узагальнена математична модель відносної статичної похибки ЕМЗВТ, яка визначена через чутливість або статичні коефіцієнти передачі ВП. Ця модель дозволяє конкретизувати оцінки відносної статичної похибки електромеханічних засобів вимірювальної техніки побудованих за різними структурними схемами при їх експлуатації. Використання уточнених оцінок статичної похибки ЕМЗВТ надасть можливість отримувати достовірну інформації про стан ВТ під час проведення МОБ та безпосередньо при застосуванні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бережнюк І. Г. Військова техніка : митна енциклопедія. Хм. : ПП Мельник А. А., 2013. Т. 1 : А – Л. 472 с.
2. Войтенко С.С. Методика визначення оптимального розміщення виїзних метрологічних підрозділів на прикладі проведення операції Об'єднаних сил / С.С. Войтенко, О.О. Бабич, В.В. Мошаренков // Системи озброєння і військова техніка. – 2020. – № 2(62). – С. 52-58. DOI: <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.62.07>.
3. Войтенко С.С. Пропозиції щодо реформування системи контролю технічного стану зразків озброєння та військової техніки / С.С.Войтенко, В.В. Мошаренков // Збірник матеріалів VII міжнародної науково-технічної конференції “Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи”. – Харків, 18-19 лютого 2020 р. – С. 19-20.
4. Нестерчук Д.М. Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології: конспект лекцій / Д.М.Нестерчук. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр “Люкс”, 2020. - 256 с
5. Данилов А.А. Калибровочные характеристики средств измерений в рабочих условиях эксплуатации / А.А. Данилов, Ю.В. Кучеренко, М.В. Бержинская, К.И. Мальцева // Системи обробки інформації. – 2015. – № 2(127). – С. 32-34
6. Мошаренков В.В. Оцінки методичних похибок повірки електровимірювальних приладів змінного струму кусково-східчастими сигналами спеціальної форми / В.В. Мошаренков // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Х., 2016. – Вип. 3 (24). – С. 141–144.
7. Мошаренков В.В. Розробка методу оцінки методичних похибок калібрування електровимірювальних приладів змінного струму сигналами прямокутної форми типу «меандр» / В.В. Мошаренков // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПНТУ, 2020. – Т. 3 (61). – С. 41-43. – doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.04>
8. Войтенко С.С. Метрологічне забезпечення радіотехнічних військ: Навч.-методичний посібник / С.С. Войтенко, В.В. Мошаренков – ХНУПС, 2020.–176 с.
9. Єременко В.С. Етапи створення універсального алгоритму обробки вимірювальної інформації при побудові градувальних характеристик / О.О. Редько, В.С. Єременко // Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення: все-укр. наук.-техн. конф., 17-18 квітня 2015 р.: тези допов. –Житомир, ЖДТУ, 2015. – С. 27-30.
10. Основи метрології та електричних вимірювань / Д. Л. Лавренова, В. М. Хлистов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. –Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 133 с.

REFERENCES

1. Berezhniuk, I. H. (2013), *Military equipment : customs encyclopedia*. Volume 2. Khmelnytskyi, 472 p.
2. Voitenko, S., Babych, O. and Mosharenkov, V. (2020), “The methods of determination of the optimum placing of mobile metrological subdivisions on of the Joint Forces Operation”, *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 2(62), pp. 52-58, DOI: <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.62.07>.
3. Voitenko, S.S. and Mosharenkov, V.V. (2020), “Proposals for reforming the control system of the technical condition of samples of weapons and military equipment”, *Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference Metrology, Information and Measurement Technologies and Systems*, 18-19 February, Kharkiv, Ukraine, pp. 19-20.
4. Nesterchuk, D.M. (2020), *Control and measuring devices with the basics of metrology: lecture notes*, Publishing and printing center “Liuks”, Melitopol, 256 p.
5. Danylov, A.A., Kucherenko, Yu.V., Berzhynskaia, M.V. and Maltseva, K.Y. (2015), “Kalybrovochnyie kharakterystyky sredstv izmerenyi v rabochykh usloviyakh ekspluatatsyy”, *Information Processing Systems*, Vol. 2(127), pp. 32-34.
6. Mosharenkov, V.V. (2016), “Assessment of methodological errors verification electric measuring devices of accurrent piecewise-speed signals special form”, *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 3(24), pp. 141-144.

7. Mosharenkov, V. (2020) "Development of methodological errors assessment method calibration electric measuring devices of current rectangular wave from the «meander» type", *Control, Navigation and Communication Systems*. Academic Journal. Poltava: PNTU, 3(61), pp. 41-43. doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.04>
8. Voitenko, S.S. and Mosharenkov, V.V., (2020), *Metrological support of radio troops*: Textbook, HUPS, Kharkiv, 176 p.
9. Yeremenko, V.S. and Redko, O.O., (2015), "Stages of creation of universal algorithm of processing of measuring information at construction of calibration characteristics", *Kompiuterni tekhnologii: innovatsii, problemy, rishennia* [Computer technologies: innovations, problems, solutions], Zhytomyr, Ukraine, 17-18 April, pp. 27-30.
10. Lavrenova, D.L. and Khlystov, V.M., (2019), *Fundamentals of metrology and electrical measurements*, Kyiv, 133 p.

Received (Надійшла) 15.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.04.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Мошаренков Віктор Васильович – кандидат технічних наук, доцент кафедри, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Viktor Mosharenkov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: mosharenkov@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7227-9472>.

Войтенко Сергій Станіславович – кандидат технічних наук, доцент, інженер з метрології 2 категорії, ДП «Харківський регіональний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації», Харків, Україна;

Serhii Voitenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Metrology Engineer of the 2 category, State Enterprise "Kharkiv regional research and production center for standardization, metrology and certification", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: sergej.010679@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4134-5964>.

**Разработка математической модели статической погрешности
электромеханических средств измерительной техники**

В. В. Мошаренков, С. С. Войтенко

Аннотация. Для поддержания военной техники пригодной к применению, проводят мероприятия по техническому обслуживанию, важной и неотъемлемой частью которого является метрологическое обслуживание. Эффективность метрологического обслуживания зависит от полноты охвата контролируемых параметров, периодичности и достоверности их измерительного контроля. Наиболее распространенными, в настоящее время, при контроле параметров военной техники являются электромеханические средства измерительной техники. Основной метрологической характеристикой электромеханических средств измерительной техники в статическом режиме измерения является номинальная калибровочная характеристика. В течении эксплуатации, калибровочная характеристика электромеханических средств измерительной техники, под влиянием различных факторов, имеет отклонения от номинальной, что приводит к инструментальной статической погрешности. В статье рассматриваются прикладные аспекты оценки статической погрешности электромеханических средств измерительной техники, которая выражена через чувствительность или статические коэффициенты передачи измерительных преобразователей. По результатам анализа получена обобщенная математическая модель относительной статической погрешности электромеханических средств измерительной техники для различных структурных схем соединения измерительных преобразователей. Предложено применять обобщенную математическую модель для оценки относительной статической погрешности электромеханических средств измерительной техники (при различных структурных схемах построения) во время их эксплуатации. Использование уточненной статической погрешности позволит уточнять калибровочную характеристику электромеханических средств измерительной техники, что в свою очередь приведет к получению достоверной информации о состоянии военной техники во время проведения метрологического обслуживания и непосредственно перед применением.

Ключевые слова: военная техника; электромеханические средства измерительной техники; измерительный преобразователь; статическая погрешность; градуировочная характеристика; обобщенная математическая модель.

Development of a generalized mathematical model of static error electromechanical measuring equipment

Viktor Mosharenkov, Serhii Voitenko

Abstract. To keep military equipment fit for use, carry out maintenance activities, an important and integral part of which is metrological service. The effectiveness of metrological services depends on the completeness of the coverage of the monitored parameters, frequency and reliability of their measuring control. The most common, at present, when controlling the parameters of military equipment are electromechanical measuring equipment. The main metrological characteristic of electromechanical measuring instruments in a static measurement mode is the nominal calibration characteristic. During operation, the calibration characteristic of electromechanical measuring instruments, under the influence of various factors, has deviations from the nominal, which leads to an instrumental static error. The article deals with the applied aspects of assessing the static error of electromechanical measuring equipment, which is expressed through the sensitivity or static transmission coefficients of measuring transducers. Based on the results of the analysis, a generalized mathematical model of the relative static error of electromechanical measuring equipment for various structural schemes of connecting measuring transducers was obtained. It is proposed to apply a generalized mathematical model to assess the relative static error of electromechanical measuring instruments (with various structural schemes) during their operation. The use of an updated static error will allow to refine the calibration characteristics of electromechanical measuring instruments, which in turn will lead to obtaining reliable information about the state of military equipment during metrological maintenance and immediately before use.

Keywords: military equipment; electromechanical measuring devices; measuring transducer; static error; calibration characteristic; generalized mathematical model.

Adaptive control methods

УДК 004.89

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.07>

І. М. Бутко

ДП «Центр Державного земельного кадастру», Київ, Україна

МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ПРИЙНЯТТЯ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ГЕОПРОСТОРОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Анотація. У статті запропоновано модель та метод прийняття управлінських рішень на основі аналізу геопросторової інформації. **Метою статті** є удосконалення моделі та методу прийняття управлінських рішень на основі аналізу геопросторової інформації. **Результати:** запропоновано алгоритм процесу прийняття управлінського рішення, який складається з ситуаційної та концептуальної частини; запропоновано алгоритм дій керівника організації на основі розробленої моделі прийняття управлінського рішення; розглянута ситуація, коли якість рішення залежить від зовнішніх факторів, на які орган прийняття рішення не впливає; наведена загальна схема методу прийняття управлінських рішень на основі аналізу геопросторової інформації. Використовуваними **методами** є: методи системного аналізу, теорії прийняття рішень, обробки інформації, оптимальних рішень, теорії ймовірності. **Висновки.** Удосконалено модель прийняття управлінських рішень, яка, на відміну від відомих, є динамічною і базується на відборі рішень, що є оптимальними за комбінованим критерієм, при цьому використовується прогнози значення ймовірностей станів середовища, що забезпечує обґрунтованість управлінських рішень. Отримав подальший розвиток метод прийняття управлінських рішень на основі аналізу геопросторової інформації, який базується на моделях прогнозування даних та прийняття управлінських рішень і використовує метод семантичної сегментації видових зображень для оцінки апріорних ймовірностей станів середовища, що забезпечує можливість прийняття рішення в умовах ризику та невизначенності. Напрямок подальших досліджень є розробка інформаційної технології прийняття управлінських рішень на основі аналізу геопросторової інформації.

Ключові слова: геопросторова інформація; управлінське рішення; метод прийняття управлінських рішень; модель прийняття управлінських рішень; інформаційна ситуація; ситуація прийняття рішень; критерій прийняття рішень.

Вступ

Постановка проблеми. На сьогоднішній день існує велика кількість проблемно-орієнтованих геоінформаційних систем. В основу даних систем покладена картографічна, топографо-геодезична, аерокосмічна інформація, яка представлена у цифровому вигляді, яка є дуже зручною завдяки візуалізації великої кількості різномірної інформації та яка дає можливість вирішення цілого комплексу різних завдань управління, планування та використання ресурсів в різних галузях людської діяльності [1-2]. Для цього необхідні комплексні спеціалізовані методики автоматизованого прийняття управлінських рішень, які засновані на обробці геопросторової інформації та які реалізовані в складі систем підтримки прийняття рішень.

Сьогодні в Україні існує значна кількість геоінформаційних систем різного призначення із великим об'ємом накопиченої інформації, яка постійно оновлюється. Великі об'єми геопросторових даних, достатньо складні структурно-геометричні форма та розташування об'єктів на зображеннях, обов'язковий облік в обчисленні кількісних атрибутів, складності координатної прив'язки та наступного аналізу визначають значні затрати часу на прийняття управлінських рішень. Тому існує проблема оперативного та автоматизованого використання такої інформації при прийнятті рішень на основі аналізу геопросторової інформації, що дозволило б суттєво зменшити долю суб'єктивних помилок при прийнятті управлінських рішень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Проведений аналіз останніх досліджень показав найбільш перспективними з точки зору обробки геопросторових даних є проблемно-орієнтовані геоінформаційні системи [1-2]. Оскільки одна з функцій складних геоінформаційних систем різного призначення є забезпечення особи, що приймає рішення необхідною об'єктивною інформацією та можливими рекомендаціями щодо прийняття рішень, то для створення подібних систем доцільно застосовувати системи підтримки прийняття управлінських рішень [3]. На сьогоднішній день існує велика кількість різних підходів для вибору обґрунтованих рішень для надання таких рекомендацій.

В [4] запропоновано розробка концептуальної моделі підтримки прийняття рішень для галузевих геоінформаційних систем та методу на її основі. Інформаційна модель геоданих полягає у формалізованому поєднанні їх просторової та атрибутивної складових, що враховує реляційну, семантичну та фреймові моделі представлення знань атрибутивної складової.

В [4] розроблено метод підтримки прийняття рішень при побудові галузевої геоінформаційної системи, який враховує концептуальну модель підтримки прийняття рішень для галузевих геоінформаційних систем. Але запропонований підхід розроблений лише для галузевих геоінформаційних систем, тобто для систем, які вивчають проблеми лише однієї галузі.

В [5] для розв'язування задач управління якістю повітря в ході створення сучасних систем під-

римки прийняття рішень запропоновано використувати геоінформаційні системи з метою підготовки, систематизації та аналізу вхідних даних; візуалізації та аналізу просторових характеристик розрахованих показників. Але спосіб інтеграції підсистеми просторового моделювання в системі підтримки прийняття рішень вибирають залежно від призначення системи та наявного стану взаємодії підсистем моделей і баз даних.

Тому є необхідність удосконалення моделі прийняття управлінських рішень, яка, на відміну від відомих, буде динамічною та буде базуватися на відборі рішень, що є оптимальними за комбінованим критерієм. Та розробка методу прийняття управлінських рішень на основі аналізу геопросторової інформації геоінформаційних систем різного призначення, який базується на моделях прогнозування даних та прийняття управлінських рішень, що забезпечує можливість прийняття рішення в умовах ризику та невизначеності.

Таким чином, **метою статті** є удосконалення моделі та методу прийняття управлінських рішень на основі аналізу геопросторової інформації.

Основний матеріал

Алгоритм процесу прийняття рішень у системах обробки геопросторової інформації є формалізованою схемою опрацювання інформації, яка описує послідовність дій кожного етапу моделі, що об'єднані в єдину систему [6]. Даний процес є ітераційним – операції, які виконуються на кожному етапі, повторюються до тих пір, доки не буде знайдено рішення, яке задовольняє вимоги за заданим критерієм (рис. 1) [7].

Модель складається із ситуаційної та концептуальної частини. Основними елементами ситуаційної частини моделі є блок даних та блок ситуації. Блок даних включає визначення об'єкта зацікавленості та наявних інформаційних ресурсів, агрегування та отримання геопросторової інформації з заданими характеристиками. Блок ситуації включає аналіз поточної ситуації на об'єкті зацікавленості, визначення моделі загроз та аналіз поточних збитків від діяльності на об'єкті.

В свою чергу концептуальна частина моделі включає блок цілі та блок вибору. Блок цілі визначає пріоритетність реагування на негативний вплив, блок вибору складається із визначення та розробки сценаріїв, планів, алгоритмів усунення негативного впливу та визначення параметрів необхідної інформації для подальшого контролю ситуації.

З метою підвищення ефективності управлінського впливу на основі розробленої моделі прийняття управлінського рішення запропоновано алгоритм дій керівника організації (рис. 2) [8].

Розглянемо тепер ситуацію, коли якість рішення залежить від зовнішніх факторів, на які орган прийняття рішення не впливає.

У [7], [9] вважається, що модель прийняття рішення є статичною, тобто її параметри не залежать від часу. В даній роботі буде проведено узагальнення для динамічної моделі.

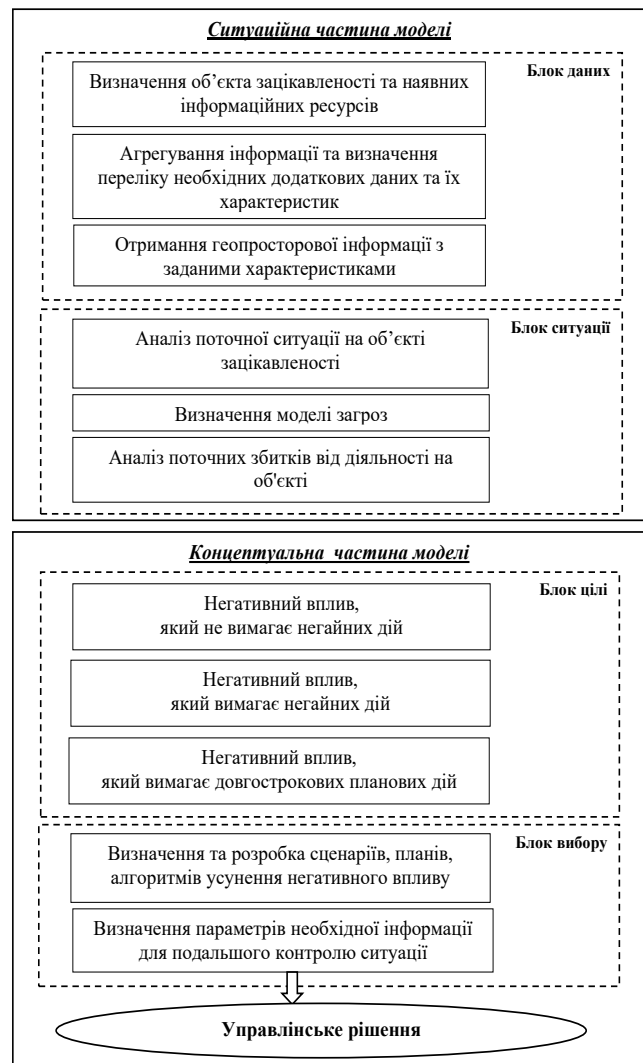


Рис. 1. Алгоритм процесу прийняття управлінського рішення
(Fig. 1. Algorithm of the management decision-making process)

Досліджуючи статичні моделі прийняття рішень, будемо виходити із таких припущень [9]:

1) орган управління має в наявності множину взаємовиключних рішень:

$$\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\}, \quad (1)$$

з яких треба вибрати тільки одне;

2) середовище C описується множиною взаємовиключних станів:

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\} \quad (2)$$

і може перебувати в одному з них, однак на момент прийняття рішення органу управління невідомо, у якому стані воно перебуває (або буде перебувати);

3) визначено оціночний функціонал:

$$F = \{f_{jk}\}, \quad (3)$$

який характеризує "виграш" або "програш" органу управління при виборі ним рішення $\varphi_k \in \Phi$ якщо середовище буде перебувати (або перебуває) в стані $\theta_j \in \Theta$.

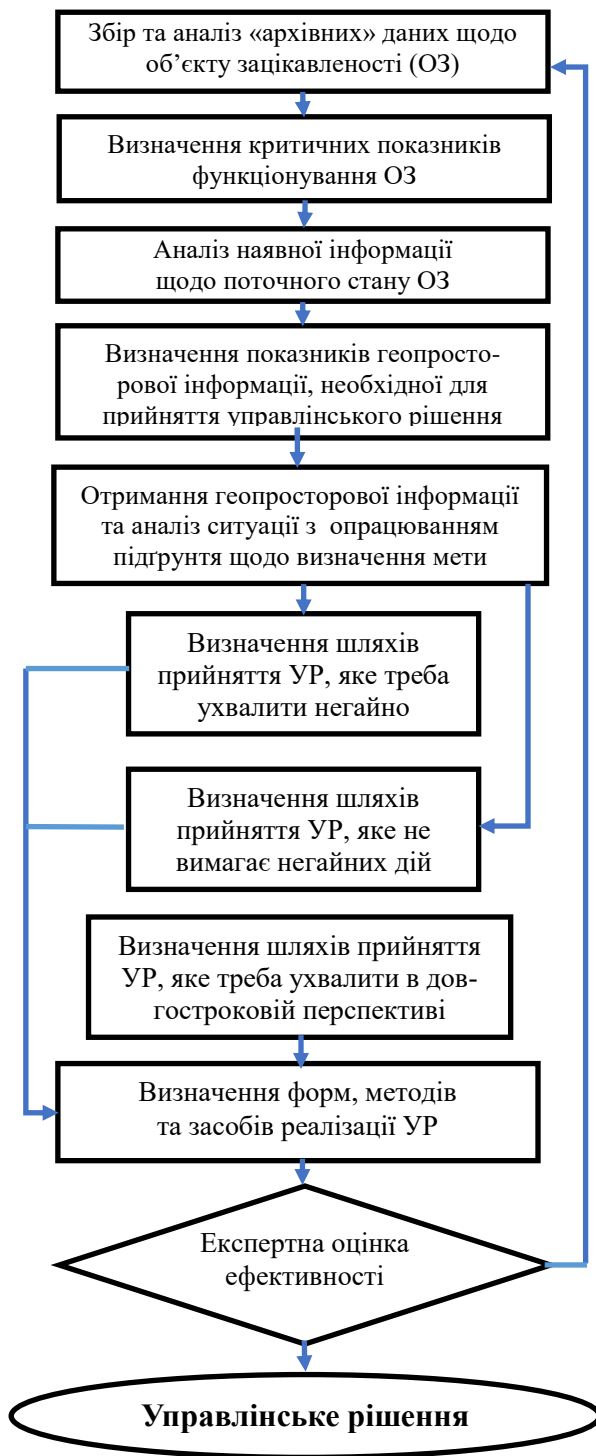


Рис. 2. Алгоритм дій прийняття управлінського рішення (Fig. 2. Algorithm of management decision-making actions)

Виходячи з цих припущень, процес прийняття рішень в умовах невизначеності може бути описаний такою схемою:

1. Формування множини можливих рішень органу управління Φ та множини станів середовища Θ .
2. Визначення та задання основних показників ефективності й корисності, які входять у розрахунок оцінного функціонала F .
3. Визначення органом управління інформаційної ситуації, яка описує стратегію поведінки середовища C .

4. Вибір критерію прийняття рішень із множини критеріїв, які характеризують визначену органом управління інформаційну ситуацію.

5. Прийняття оптимального, за вибраним критерієм, рішення або його корекція.

Таким чином, під *ситуацією прийняття рішень* будемо розуміти трійку Φ , в якій $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\}$ – множина можливих рішень органу управління; $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ – множина можливих станів середовища; $F = \{f_{jk}\}$ – оцінний функціонал, де $f_{jk} = f(\theta_j, \varphi_k)$.

У розгорнутій формі ситуація прийняття рішень характеризується матрицею (4) [10]-[11]:

$$\begin{matrix}
 & \varphi_1 & \varphi_2 & \dots & \varphi_k & \dots & \varphi_m \\
 \theta_1 & f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1k} & \dots & f_{1m} \\
 \theta_2 & f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2k} & \dots & f_{2m} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \theta_j & f_{j1} & f_{j2} & \dots & f_{jk} & \dots & f_{jm} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \theta_n & f_{n1} & f_{n2} & \dots & f_{nk} & \dots & f_{nm}
 \end{matrix} \quad (4)$$

З категорією оцінчного функціонала тісно пов'язані такі поняття як ефективність, корисність, втрати, ризик тощо. При цьому вибір тієї чи іншої форми функціонала залежить від конкретних задач управління. Зазвичай використовують дві його форми: ті, що визначають корисність, або ті, що визначають втрати.

Якщо орган управління, приймаючи рішення, виходить із необхідності досягнення максимуму оцінчного функціоналу, то будемо його позначати як

$$F = F^+ = \{f_{jk}^+\} \quad (5)$$

Коли орган управління виходить із потреби досягнення мінімуму оцінчного функціоналу, то

$$F = F^- = \{f_{jk}^-\} \quad (6)$$

Інформаційною *ситуацією прийняття рішень* будемо називати ступінь градації невизначеності у виборі середовищем своїх станів із заданої множини Θ в момент прийняття рішення органом управління.

Виділяють такі *інформаційні ситуації* [12]:

I1 – задано розподіл апріорних імовірностей на елементах множини станів середовища Θ , цю ситуацію називають також ситуацією прийняття рішень *в умовах ризику*;

I2 – має місце заданий розподіл імовірностей з невідомими параметрами;

I3 – задано системи лінійних відношень порядків на компонентах апріорного розподілу станів середовища C ;

I4 – розподіл імовірностей на множині станів середовища Θ невідомий;

I5 – наявність антагоністичних інтересів середовища в процесі прийняття рішення;

I6 – "проміжний" між I1 та I5 вибір середовищем своїх станів;

I7 – існування нечіткої множини станів середовища.

Критерієм прийняття рішень будемо називати алгоритм, що визначений для кожної ситуації прийняття рішень та інформаційної ситуації I, який дозволяє обрати єдине оптимальне рішення $\varphi_{k=k_0}$ з множини Φ або встановити множину таких рішень, які називають еквівалентними за даним критерієм.

Будемо розглядати надалі тільки основну інформаційну ситуацію II.

Перша інформаційна ситуація II характеризується заданим розподілом апіорних імовірностей на елементах множини Θ , а саме:

$$p = (p_1, p_2, \dots, p_n), \quad (7)$$

$$\text{де} \quad p_j = p(\Theta = \Theta_j). \quad (8)$$

і виконується умова (9):

$$\sum_{j=1}^n p_j = 1. \quad (9)$$

Зауважимо, що у реальних задачах розрахунок апіорного розподілу (7), здійснюється або шляхом обробки великого обсягу статистичного матеріалу, або на основі аналітичних методів, які базуються на гіпотезах про поведінку середовища та на застосуванні методів і теорем теорії ймовірності. Отриманий у такий спосіб апіорний розподіл ймовірності називають *об'єктивним*. Разом з тим, іноді застосування таких методів неможливе, оскільки немає достатньої кількості статистичного матеріалу, середовище характерне складною "поведінкою", у цих умовах орган прийняття рішень може використати для формулювання значень апіорного розподілу ймовірності оцінки експертів, які добре орієнтуються в ситуації. Таке визначення ймовірності називається *суб'єктивним*.

Опишемо основні критерії прийняття рішень у ситуації II [12]-[13].

1. Згідно з *критерієм Байєса* C^B , оптимальними рішеннями $\varphi_{k=k_0}$ (або множиною таких рішень) вважають такі, для яких математичне сподівання оціночного функціонала набуває найбільшого (або найменшого) можливого значення, а саме:

$$k_0 = \arg \max_k B^+(\varphi_k, p); \quad (10)$$

$$\text{де} \quad B^+(\varphi_k, p) = \sum_{j=1}^n f_{jk}^+ p_j, \quad (11)$$

або, відповідно,

$$k_0 = \arg \min_k B^-(\varphi_k, p); \quad (12)$$

$$B^-(\varphi_k, p) = \sum_{j=1}^n f_{jk}^- p_j. \quad (13)$$

Критерій Байєса є найбільш використовуваним в інформаційній ситуації II. Його доцільно застосовувати тоді, коли ситуація повторюється багато разів, оскільки за таких умов максимізується середнє значення корисності (або мінімізується середній ризик).

2. *Критерій мінімуму дисперсії оціночного функціонала* C^{var} . Для кожного рішення φ_k визначимо дисперсію $\sigma^2(\varphi_k, p)$ оціночного функціонала:

$$\sigma^2(\varphi_k, p) = \sum_{j=1}^n (f_{jk} - B(\varphi_k, p))^2 p_j, \quad (14)$$

тоді оптимальне рішення $\varphi_{k=k_0}$ визначається як

$$k_0 = \arg \min_k \sigma^2(\varphi_k, p). \quad (15)$$

3. *Комбінований критерій* C^{comb} . Являє собою комбінацію критеріїв Байєса C^B та мінімуму дисперсії C^{var} , де враховано природне бажання органу управління забезпечити найкраще середнє значення (критерій Байєса) та мінімальну дисперсію.

Виберемо величину λ , $0 \leq \lambda \leq 1$ і для кожного з рішень φ_k обчислимо значення критерію C^{comb} за формулою (16):

$$K(\varphi_k, p) = (1-\lambda)B(\varphi_k, p) - \lambda\sigma^2(\varphi_k, p). \quad (16)$$

Найкращим є рішення $\varphi_{k=k_0}$, для якого

$$k_0 = \arg \max_k K(\varphi_k, p). \quad (17)$$

Зауважимо, що при цьому значення коефіцієнта λ встановлюють з огляду на те, якому саме критерію (Байєса чи мінімуму дисперсії) потрібно надати більшу перевагу. Якщо $\lambda = 0$, то критерій $K(\varphi_k, p)$ збігається з критерієм Байєса, а коли $\lambda = 1$ – із критерієм мінімуму дисперсії.

Як вказано у [14]-[15], граничні значення параметра λ , за якими встановлюють перевагу критеріїв, обчислюються за формулами (18)-(19):

$$\lambda^* = \min_k \left(\sum_{j=1}^n p_j f_{jk} \right)^2 / \sum_{j=1}^n p_j f_{jk}^2; \quad (18)$$

$$\lambda^{**} = \max_k \left(\sum_{j=1}^n p_j f_{jk} \right)^2 / \sum_{j=1}^n p_j f_{jk}^2. \quad (19)$$

Очевидно, що задовольняється нерівність (20):

$$0 \leq \lambda^* \leq \lambda^{**} \leq 1. \quad (20)$$

Запропонуємо модель прийняття управлінських рішень, що є оптимальними за комбінованим критерієм. При цьому значення параметра λ пропонується обирати як середину інтервалу $[\lambda^*, \lambda^{**}]$, тобто:

$$\lambda = (\lambda^* + \lambda^{**}) / 2. \quad (21)$$

Оцінка імовірностей $p(\Theta_j)$ проводиться за результатами тематичної інтерпретації видових зо-

бражень. Для переходу від стаціонарної до динамічної моделі прийняття рішення необхідно використовувати прогнозні значення $p_t(\theta_j)$, що визначаються за допомогою моделі прогнозування геопросторових даних. Таким чином, удосконалено модель прийняття управлінських рішень, яка, на відміну від відомих, є динамічною і базується на відборі рішень, що є оптимальними за комбінованим критерієм, при цьому використовується прогнозні значення імовірностей станів середовища, що забезпечує обґрунтованість управлінських рішень.

Для прийняття обґрунтованих управлінських рішень перш за все необхідно вибрати множину станів середовища $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$, де n – кількість станів. Прикладом таких станів можуть бути: наявність рослинності, водної поверхні, міської забудови тощо.

Оцінки апіорних імовірностей перебування у поточний момент часу t у даних станах $p_j = p(\Theta = \theta_j)$ (для $1 \leq j \leq n$) отримуємо з результатів тематичної інтерпретації видових зображень. Для цього проводимо сегментацію зображень за допомогою згорткової мережі, яка навчена по відповідній множині тестових зображень.

Якщо вихід мережі S_k – індексне зображення, якому кожен піксель приймає значення $1 \leq k \leq K$, де K – кількість класів сегментації ($K \geq n$), то маска ϑ_k для кожного класу k отримується як

$$\vartheta_k = \sum_{k'} S_k \delta_{kk'}. \quad (22)$$

У такому випадку для оцінки апіорних імовірностей для області інтересу W можна записати:

$$p_j = \frac{1}{\sum_j \vartheta_j} \sum_{(x,y) \in W} \vartheta_j(x,y). \quad (23)$$

Для переходу від координат зображення $W(x, y)$ до географічних координат $W(\varphi, \theta, h)$ необхідно виконати геоприв'язку, що дає нам значення імовірностей $p_j(\varphi, \theta, h)$.

Оскільки дані оцінки імовірностей отримані у момент часу t , тобто

$$p_j = p_j(t), \quad (24)$$

то, щоб отримати значення апіорних імовірностей $p_j(t)$ у момент часу імплементації рішення, отримані оцінки прогноуються за допомогою розробленої адаптивної селективної моделі на базі ансамблю інтегрованих моделей авторегресії-ковзного середнього різних порядків, які вибираються в діапазоні

$$p, q = 0, 1, 2; \quad d = 0, 1. \quad (25)$$

Параметри моделей знаходяться методом найменших квадратів, так щоб мінімізувати середньоквадратичне відхилення між прогнозом і реальними даними для попередніх спостережень. Для вихідного значення береться середнє по кластеру, для якого досягається мінімум середньоквадратичного відхилення між прогнозом і реальними даними для попередніх спостережень (аналогічно до знаходження параметрів моделі).

Маючи прогнозні значення імовірностей i , вважаючи, що задано оціночний функціонал $f(\theta_j, \varphi_k)$, відбираємо рішення, що є оптимальними за модальним критерієм:

$$k_0 = \arg \max_k f(\theta_{j=j_0}, \varphi_k); \quad (26)$$

$$j_0 = \arg \max_j \bar{p}(\Theta_j, t'). \quad (27)$$

Загальна покрокова схема методу наведена на рис. 3.



Рис. 3. Загальна схема методу прийняття управлінських рішень на основі аналізу геопросторової інформації (Fig. 3. General scheme of the method of making managerial decisions based on the analysis of geospatial information)

Таким чином, отримав подальший розвиток метод прийняття управлінських рішень на основі аналізу геопросторової інформації, який базується на моделях прогнозування даних та прийняття управлінських рішень і використовує метод семантичної сегментації видових зображень для оцінки апіорних імовірностей станів середовища, що забезпечує можливість прийняття рішення в умовах ризику та невизначеності.

Висновки і напрямки подальших досліджень

Так, встановлено, що на сьогоднішній день в Україні існує значна кількість геоінформаційних

систем різного призначення з великим об'ємом накопиченої інформації, яка постійно оновлюється. Однак існує проблема оперативного та автоматизованого використання такої інформації при прийнятті рішень на основі аналізу геопросторової інформації, що дозволило б суттєво зменшити долю суб'єктивних помилок при прийнятті управлінських рішень.

Таким чином, удосконалено модель прийняття управлінських рішень, яка, на відміну від відомих, є динамічною і базується на відборі рішень, що є оптимальними за комбінованим критерієм, при цьому використовується прогнозні значення імовірностей станів середовища, що забезпечує обґрунтованість

управлінських рішень. Отримав подальший розвиток метод прийняття управлінських рішень на основі аналізу геопросторової інформації, який базується на моделях прогнозування даних та прийняття управлінських рішень і використовує метод семантичної сегментації видових зображень для оцінки

апріорних імовірностей станів середовища, що забезпечує можливість прийняття рішення в умовах ризику та невизначеності.

Напрямок подальших досліджень є розробка інформаційної технології прийняття управлінських рішень на основі аналізу геопросторової інформації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Butko I. The Use of Geospatial Information by Public Authorities to Support the Decision Making of Management. *Advanced Information Systems*. 2021. № 5(1). С. 39–44. DOI : <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.05>
2. Бутко І. М. Використання інформації геоінформаційних систем для оцінки стану земельного фонду на тимчасово окупованих територіях / І. М. Бутко, Г. В. Худов, І. А. Хижняк // Наука, техніка і технології: актуальні питання та дослідження : міжнар. наук-практ. конф., 12-13 бер. 2021 р. : тези допов. – Прага, 2021. – С. 13–17.
3. Нестеренко О. В. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень / О. В. Нестеренко, О. І. Савенков, О. О. Фаловський – Київ : Національна академія управління, 2016. – 188 с.
4. Угрін Д. І. Інформаційні технології підтримки прийняття рішень для геоінформаційних систем / Д. І. Угрін / Вісник сучасних інформаційних технологій. – 2019. – № 2 (2). – С. 122–133.
5. Ночвай В. Використання ГІС у задачах управління якістю повітря / В. Ночвай, Р. Криваківська, О. Ішук / Електроніка та інформаційні технології. – 2012. – Вип. 2. – С. 154–163.
6. Бутко І. М. Формалізація технології використання геопросторових структур в системах обробки геопросторової інформації / І. М. Бутко // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2021. – № 1 (63). – С. 17–22.
7. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С. А. Орловский. – М. : Наука, 1981. – 206 с.
8. Манокін Є. В. Модель прийняття управлінських рішень щодо забезпечення інформаційної безпеки в органах управління Державної прикордонної служби України / Є. В. Манокін // Інвестиції: практика та досвід. – 2015. – № 1. – С. 130-135. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ipd_2015_1_29.
9. Ус С. А. Моделі й методи прийняття рішень : навч. посіб. / С. А. Ус, Л. С. Коряшкіна; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – 2-ге вид. випр. – Дніпро : НТУ «ДП», 2018. – 300 с.
10. Исследование операций. Т. 1. Методологические основы и математические методы : пер. с англ. / под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. – М. : Мир, 1981. – 712 с.
11. Исследование операций. Т. 2. Модели и применения : пер. с англ. / под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. – М. : Мир, 1981. – 677 с.
12. Трухаев Р. И. Модели принятия решений в условиях неопределенности / Р. И. Трухаев. – М. : Наука, 1981. – 168 с.
13. Подиновский В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. – М. : Наука, 1982. – 254 с.
14. Катренко А. В. Теорія прийняття рішень / А. В. Катренко, В. А. Пасічник, В. П. Пасько – Л. : Новий світ – 2000, 2009. – 396 с.
15. Кини Р. Принятие решений при многих критериях, предпочтениях и замещениях: пер. с англ. / Р. Кини, Х. Райфа. – М. : Радио и связь, 1981. – 560 с.

REFERENCES

1. Butko, I. (2021), "The Use of Geospatial Information by Public Authorities to Support the Decision Making of Management", *Advanced Information Systems*, Vol. 1, No. 5, pp. 39–44, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.05>.
2. Butko, I. M., Khudov, H. V. and Khyzhniak, I. A. (2021), "Vykorystannia informatsii heoinformatsiinykh system dlia otsinky stanu zemelnoho fondu na tymchasovo okupovanykh terytoriiakh" [Use of information from geographic information systems to assess the state of the land fund in the temporarily occupied territories], *Nauka, tekhnika i tekhnologii: aktualni pytannia ta doslidzhennia : mizhnar. nauk-prakt. konf.*, 12-13 March, pp. 13–17.
3. Nesterenko, O. V., Savenkov, O. I. and Falovskiy, O. O. (2016), *Intelektualni systemy pidtrymky pryiniattia rishen* [Intelligent decision support systems], Kyiv : Natsionalna akademiia upravlinnia, 188 p.
4. Ugrin, D. I. (2019), "Informatsiini tekhnologii pidtrymky pryiniattia rishen dlia heoinformatsiinykh system" [Information technologies for decision support for geographic information systems], *Visnyk suchasnykh informatsiinykh tekhnologii*, No. 2 (2), pp. 122–133.
5. Nochvai, V., Kryvakivska, R. and Ishchuk, O. (2012), "Vykorystannia GIS u zadachakh upravlinnia yakistiu povitria" [Use of GIS in air quality management tasks], *Elektronika ta informatsiini tekhnologii*, No. 2, pp. 154–163.
6. Butko, I. M. (2021), "Formalizatsiia tekhnologii vykorystannia heoprostorovykh struktur v systemakh obrobky heoprostorovoi informatsii" [Formalization of the technology of using geospatial structures in geospatial information processing systems], *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, No. 1 (63), pp. 17–22, DOI : <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.1.017>.
7. Orlovskiy, S. A. (1981), *Problemi pryiniattia resheniy pry nechetkoi yskhodnoi ynformatsyy* [Problems of decision-making with unclear source information], Nauka, Moscow, 206 p.
8. Manokin, Ye. V. (2015), "Model pryiniattia upravlinskykh rishen shchodo zabezpechennia informatsiinoi bezpeky v orhanakh upravlinnia Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy" [Model of making managerial decisions to ensure information security in the governing bodies of the State Border Guard Service of Ukraine], *Investytsii: praktyka ta dosvid*, No. 1, pp. 130-135.
9. Us, S. A. and Koriashkina, L. S. (2018), *Modeli i metody pryiniattia rishen* [Models and methods of decision making], Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, Nats. un-t «Dniprovskya politekhnika», 2-he vyd. vypr., NTU «DP», Dnipro, 300 p.
10. Moudera, Dzh. and Elmahraby, S. (1981), *Yssledovanye operatsy. T. 1. Metodolohycheskye osnovy y matematycheskye metody* [Operations research. T. 1. Methodological bases and mathematical methods], Myr, Moscow, 712 p.

11. Moudera, Dzh. and Эlmahraby, S. (1981), *Yssledovanye operatsyi. T. 2. Modely y prymeneniya* [Operations research. T. 2. Models and applications], Myr, Moscow, 677 p.
12. Trukhaev, R. Y (1981), *Modely pryiniatya resheniy v usloviakh neopredelennosti* [Models of decision making in conditions of uncertainty], Nauka, Moscow, 168 p.
13. Podynovskyi, V. V. and Nohyn, V. D. (1982), *Pareto-optymalnye resheniya mnohokryteryalnykh zadach* [Pareto-optimal solutions of multicriteria problems], Nauka, Moscow, 254 p.
14. Katrenko, A. V., Pasichnyk, V. A. and Pasko, V. P. (2009), *Teoriia pryiniattia rishen* [Decision theory], Novyi svit–2000, Lviv, 396 p.
15. Kyny, R. and Raifa, Kh. (1981), “Pryniatye resheniy pry mnohykh kryteryakh, predpochteniyakh y zameshcheniyakh” [Decision making with many criteria, preferences and substitutions], *Radio i sviaz*, Moscow, 560 p.

Received (Надійшла) 29.01.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.03.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Бутко Ігор Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, заступник генерального директора ДП «Центр державного земельного кадастру», Київ, Україна;
Ihor Butko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy general director of SE «State Land Cadaster», Kyiv, Ukraine;
 e-mail: Ihor.Butko@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2859-0351>.

Модель и метод принятия управленческих решений на основе анализа геопрограмственной информации

И. Н. Бутко

Аннотация. В статье предложена модель и метод принятия управленческих решений на основе анализа геопрограмственной информации. **Целью** статьи является усовершенствование модели и метода принятия управленческих решений на основе анализа геопрограмственной информации. **Результаты:** предложен алгоритм процесса принятия управленческого решения, который состоит из ситуационной и концептуальной части; предложен алгоритм действий руководителя организации на основе разработанной модели принятия управленческого решения; рассмотрена ситуация, когда качество решения зависит от внешних факторов, на которые орган принятия решения не влияет; приведена общая схема метода принятия управленческих решений на основе анализа геопрограмственной информации. Используемыми **методами** являются: методы системного анализа, теории принятия решений, обработки информации, оптимальных решений, теории вероятности. **Выводы.** Усовершенствована модель принятия управленческих решений, которая, в отличие от известных, является динамичной и базируется на отборе решений, которые являются оптимальными по комбинированному критерию, при этом используется прогнозные значения вероятностей состояний среды, обеспечивающей обоснованность управленческих решений. Получил дальнейшее развитие метод принятия управленческих решений на основе анализа геопрограмственной информации, основанный на моделях прогнозирования данных и принятия управленческих решений и использует метод семантической сегментации видовых изображений для оценки априорных вероятностей состояний среды, обеспечивающей возможность принятия решения в условиях риска и неопределенности. Направлением дальнейших исследований является разработка информационной технологии принятия управленческих решений на основе анализа геопрограмственной информации.

Ключевые слова: геопрограмственная информация; управленческое решение; метод принятия управленческих решений; модель принятия управленческих решений; информационная ситуация; ситуация принятия решений; критерий принятия решений.

Model and method of making management decisions based on the analysis of geospatial information

Ihor Butko

Abstract. The article proposes a model and method of making managerial decisions based on the analysis of geospatial information. **The goal** of the article is to improve the model and method of making managerial decisions based on the analysis of geospatial information. **The results:** the algorithm of process of acceptance of the administrative decision which consists of a situational and conceptual part is offered; the algorithm of actions of the head of the organization on the basis of the developed model of acceptance of the administrative decision is offered; the situation when the quality of the decision depends on external factors on which the decision-making body does not influence is considered; the general scheme of a method of acceptance of administrative decisions on the basis of the analysis of the geospatial information is resulted. The **methods** used are: methods of systems analysis, decision theory, information processing, optimal solutions, probability theory. **Conclusions.** The model of managerial decision-making has been improved, which, unlike the known ones, is dynamic and is based on the selection of decisions that are optimal by the combined criterion, using predictive values of probabilities of environmental conditions, which ensures the validity of management decisions. The method of managerial decision-making based on geospatial information analysis, which is based on data forecasting and management decision-making models and uses the method of semantic segmentation of species images to assess the a priori probabilities of environmental conditions, further enables decision-making in conditions of risk and uncertainty. The direction of further research is the development of information technology for management decisions based on the analysis of geospatial information.

Keywords: geospatial information; managerial decision; method of making managerial decisions; model of making managerial decisions; information situation; situation of making decisions; criterion for making decisions.

В. В. Собчук, І. В. Замрій, Ю. І. Олімпієва, С. О. Лаптев

Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна

ФУНКЦІОНАЛЬНА СТІЙКІСТЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ОСНОВІ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЙРОМЕРЕЖ

Анотація. В роботі досліджуються процеси глобальної трансформації інфраструктури інформаційних технологій на фоні масового впровадження кіберфізичних систем та проривних здобутків в галузях штучного інтелекту і робототехніки у виробництво та технологічні процеси. Вивчаються характеристики поведінки складних технічних систем, що реалізують властивість функціональної стійкості таких систем. Характеризуються процеси обробки металів різанням з врахуванням особливостей впливу деформаційного зміцнення, пластичних деформацій, автоколивань та хаотичної динаміки, які виникають в обробляючих центрах. Описано способи застосування нейромереж в моделюваннях процесів механічної обробки металів різанням. Дано універсальну методику побудови нейромережних моделей процесу механічної обробки на базі штучної нейронної мережі зустрічного поширення. Ґрунтуючись на проведеному аналізі досліджено інтелектуальну систему аналізу та прогнозування динамічної стійкості технологічного процесу різання з використанням паралельних обчислень, яка гарантує виконання необхідних умов забезпечення функціональної стійкості виробничого процесу.

Ключові слова: технологічний процес; дисипативні системи; функціональна стійкість; нейронна мережа; мережа Кохонена.

Вступ

Стрімкий розвиток технічного прогресу, зумовленого домінуючою роллю інформаційних технологій, що охоплюють та пронизують практично всі аспекти економічної та соціальної діяльності людей, створює нові виклики для дослідників та практиків, порушуючи питання незворотності трансформацій цілих систем виробництва, менеджменту та управління. Головним здобутком трансформацій глобальної інформаційної інфраструктури та масштабної автоматизації виробництва є фактичне злиття автоматизованого виробництва, обміну даних і виробничих технологій в єдину саморегульовану систему з якнайменшим або взагалі відсутнім втручанням людини у виробничий процес. Нині відбувається масове впровадження кіберфізичних систем у виробництво та прориви в галузях штучного інтелекту, робототехніки, Інтернету речей, автономного транспорту, нанотехнологій, автономних машин, дронів, віртуальних помічників, програм-перекладачів, програм-радників, квантових комп'ютерів тощо. В сукупності все це в значній мірі породжує численні наслідки в функціонуванні держави, бізнесу, науки та людей, призводить до постійної модифікації наявних концепцій та теорій, надає нового змісту великій сукупності загальноживаних термінів та понять у багатьох галузях людської діяльності.

Зокрема, у результаті розширення спектру об'єктів функціональної дії складних технічних систем, включення до їх складу інформації та варіації поєднань цих об'єктів між собою, очевидною є вимога розширення техніко-об'єктного складу самих систем, до яких за загальноприйнятою практикою належать: машини, апарати, прилади, обладнання, оснащення, їх елементи у вигляді вузлів, блоків, агрегатів тощо та включення до них, насамперед, технічних об'єктів зі сфери інформаційних технологій, а саме електронних цифрових програмованих пристроїв, різноманітних гаджетів, інтелектуальних технічних та кіберфізичних систем та ін-

формаційних мереж, які за своєю природою переважно є складними або суперскладними системами. Складні технічні системи (СТС) утворюють багато-рівневі конструкції та будуються для виконання спеціальних задач. За аналогією до природних систем, розвиток таких системи призводить до ускладнення їхнього функціонування та появи нових властивостей, таких як, власне, функціональна стійкість.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. В роботах [1-3] досліджуються властивості систем, які забезпечують можливість їхнього функціонування при змінах параметрів внутрішнього та зовнішнього середовища протодовж тривалих проміжків часу постійно перебуває у фокусі уваги науковців. Насамперед це стосується високоорганізованих технічних і більшості біологічних систем. Властивість функціональної стійкості притаманна не лише біологічним видам, але і складним технічним системам. Характер поведінки системи вибирається відповідно до змін зовнішніх умов і з функціональним інваріантом системи, який можна назвати внутрішньою метою її функціонування. Вибір поведінки припускає також наявність деякої множини можливих різноманітних наслідків, об'єднаних загальною властивістю відповідності одній зовнішній причині в цих умовах. Це забезпечується за рахунок відповідної зміни структури і поведінки системи, навіть при зниженні якості функціонування системи. Залежно від міри складності організації інформаційних систем підприємства та рівня аналізу, властивість функціональної стійкості може проявлятися (й відповідно кількісно оцінюватися) у вигляді стійкості до помилок, надійності, живучості, відмовостійкості, адаптивності, завадостійкості тощо.

Під функціональною стійкістю об'єкту розуміється його властивість зберігати спроможність впродовж заданого часу виконання своїх основних функцій в межах, встановлених нормативними вимогами, в умовах впливу потоку відмов, несправностей, збоїв. Функціональна стійкість характеризується можливостями системи: виконувати встанов-

лений мінімальний об'єм своїх функцій при зовнішніх і внутрішніх діях, що невизначені умовами нормальної експлуатації; виконувати вибір оптимального режиму функціонування за рахунок власних внутрішніх ресурсів; перебудовувати структуру, змінювати функції окремих підсистем і їх поведінку.

Роботи [4, 5] досліджують стійкість систем від несанкціонованих доступів з точки зору стійкості системи та її здатності виконувати задані функції з деяким допустимим зниженням якості. Причому дії на систему можуть мати як природний, так і умисний характер. Основною особливістю функціонально стійких систем є їх здатність деградувати на структурному рівні до повної відмови системи, тобто виключати із структури елементи, що відмовили, перебудовувати структуру, налаштовувати параметри системи для пристосування (адаптації) до нових умов експлуатації. Робота [6] описує методику створення єдиного інформаційного простору на сучасному виробничому підприємстві з функціонально стійким виробничим процесом. Сучасні промислові підприємства у великій мірі автоматизовані та здатні автономно виконувати багато технологічних процесів протягом наперед заданих часових інтервалів випускаючи продукцію з високими стандартами споживчої та експлуатаційної якості. Залежно від типу, призначення, способу організації технічної системи, нині гостро стоїть проблема мінімізації впливу людського фактору у виробничих процесах, розвитку критеріїв оцінки і методів підвищення функціональної стійкості для інформаційних систем підприємства; ретельне вивчення окремих класів технічних систем і визначення найбільш ефективних засобів підвищення їх функціональної стійкості.

Водночас в останні роки ми переживаємо справжній бум розвитку технологій штучного інтелекту та їх широке впровадження в різноманітні сфери людської діяльності, в тому числі й їх інтеграцію у виробничі процеси сучасних підприємств. Так в роботах [9, 10] нейронні мережі з самоорганізацією (self-organizing neural networks), відомі як карти Кохонена (Kohonen maps) застосовуються для діагностування стану технічних систем. Нейронна мережа з самоорганізацією використовується для діагностування несправностей обладнання. При цьому використовується здатність мережі до стискання даних, тобто до представлення множини точок вектором ваг одного нейрона. Фундаментальним тут є припущення про те, що кожний клас дефектів породжує специфічну зміну характеристик обладнання. Нейрон, який перемагає в конкуренції характеризує або нормальний режим роботи, або певну несправність. Нейронні мережі з самоорганізацією активують єдиний нейрон, що дозволяє локалізувати пошкоджений елемент незалежно від стану решти. В роботі [9] для виявлення дефектів датчиків використовується нейронна мережа з самоорганізацією з обмеженнями на значення ваг (constrained Kohonen network). Це дозволяє правильно класифікувати дефекти, навіть якщо вхід системи залежить від стану системи чи при дрейфі нуля датчиків. В роботі [10] нейронна мережа Кохонена використовується

для діагностування хімічного процесу плавки металів.

Таким чином для забезпечення функціональної стійкості технологічних процесів виробничих підприємств можна широко застосовувати різні класи нейронних мереж [13] для забезпечення діагностики стану обладнання на кожному виробничому центрі. Навчаючи нейронні мережі враховуючи умову функціональної стійкості технологічного процесу буде забезпечена ефективна робота як виробничого обладнання, так і поточний контроль дотримання якості продукції згідно визначеної системи толерансів.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є вдосконалення і розробка методів організації виробничих процесів обробки металів на машинобудівних підприємствах та підприємствах гірничо-металургійного комплексу з використанням нейромереж. Для досягнення мети вирішено такі завдання:

- проаналізувати способи застосування нейромереж в технології обробки металів на машинобудівних підприємствах, визначити їх переваги і недоліки;
- запропонувати і обґрунтувати універсальну побудову нейромережових моделей процесу механічної обробки на базі штучної нейронної мережі зустрічного поширення;
- дослідити інтелектуальну систему аналізу та прогнозування динамічної стійкості технологічного процесу різання з використанням паралельних обчислень.

1. Характеристика процесів обробки металів різанням

Процеси обробки металів різанням за точністю, якістю обробки деталей, а також продуктивності та економічності є більш конкурентоспроможними в порівнянні з іншими методами формоутворення.

В основі процесу різання є пластичне деформування та руйнування зрізаного шару. У свою чергу, процес пластичного деформування зрізаного шару викликає деформацію пружних елементів загальної системи верстата і за певних обставин втрату її стійкості. Динамічна нестійкість процесу розрізання викликає також зниження шорсткості обробленої поверхні, зношування інструментів, що обумовлює необхідність зниження режимів обробки деталей, а відтак й продуктивності [13].

Різання таких матеріалів як нержавіюча і вогнетривка сталь, їх сплавів, що мають схильність до деформаційного зміцнення, що характеризується інтенсивними вібраціями, характерним ошуркуванням і підвищеним зношуванням інструментів.

У вуглецевих сталях основною домішкою є вуглець, який, розташовуючись на границях зерен, може сприяти їх окрихчуванню. Із зростанням температур дифузійна рухливість вуглецю зростає, що полегшує проковзування зерен, збільшує і змінює форму ошурків. Слід зазначити, дислокації не зазнають термічної активації, тому міра деформації зрізаного шару і сили різання знижуються.

Схильність матеріалів, які обробляються різанням до деформаційного зміцнення залежить від їх

електронної та дислокаційної структур, енергії дефекту упаковки матеріалу в зерно, наявності домішок, швидкості деформування, температури, типу кристалічної решітки тощо, а також від швидкості перебігу процесів знеміцнення.

В [13] детально вивчені особливості механізмів руйнування металів з підвищенням швидкості деформування в умовах розтягування з різною кристалічною решіткою, дано аналіз зламів, що дозволяє зв'язати цей ефект з крихким руйнуванням елементів ошурків, як менш енергоємним механізмом руйнування зі зростанням швидкості різання, а відтак, із збільшенням швидкості деформування і зростанням межі плинності матеріалу, зменшенням при цьому й зони локалізації деформації. Водночас важливим є ефект зростання температури при збільшенні швидкості різання.

Поряд з цими невід'ємними факторами, що характерні обробці металів різанням, слід зазначити, що цьому процесу властиві й режими автоколивань. Власне експериментальні дослідження свідчать [13] про наявність автоколивного режиму структурних перебудов при деформації матеріалів в умовах різання. Тому внутрішнім джерелом, що викликає зсув фази сили різання r , а отже, виникнення автоколивань, є періодична локалізація пластичної деформації в системі різання. Рух локалізованих хвиль деформації поширюється від вільної поверхні до ріжучого леза. Хвиля деформації в прирізцевому шарі також рухається до леза, викликаючи періодичну втрату контакту інструмента з заготовкою. В першому наближенні *енергія локалізованих хвиль деформації* може бути визначена таким способом

$$\Delta U_{\dot{a}} = E_0 \cdot \rho = \alpha \cdot G \cdot b^2 \cdot \rho,$$

де $\Delta U_{\dot{a}}$ – енергія пружної деформації, E_0 – питома енергія деформації, що відповідає одиниці довжини дислокації, ρ – щільність дислокації, G – модуль зсуву, α – коефіцієнт.

Амплітуду хвилі деформації h оцінюють так:

$$\varepsilon = 2 \ln(h/d_k),$$

де ε – ступінь деформації, d_k – розмір комірки (фрагменту $\sim 1/\sqrt{\rho}$).

В [13] також вивчені умови детермінованого хаосу в динамічних процесах механічної обробки. Показано, що для розвитку хаотичних рухів достатньо трьох ступенів свободи пружної системи металообробного верстата. На цій основі запропонована динамічна модель і вивчені різні сценарії хаотизації пружної системи металообробного верстата, зокрема солітонний сценарій хаотизації пружної системи верстата (рис. 1), як один з найбільш вірогідних сценаріїв. Побудова атракторів [14], оцінка d_F фрактальної розмірності і λ показників Ляпунова по напрямку сили P_z та P_y показали, що атрактором по напрямку сили P_y відповідають менші величини d_F , та має нульове значення λ .

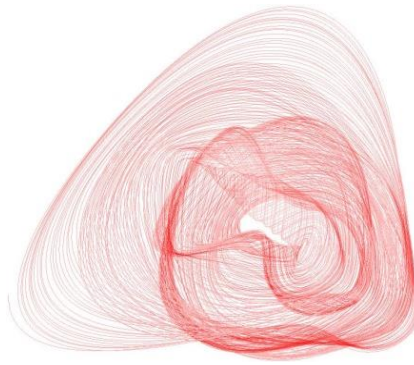


Рис. 1. Вигляд реконструйованого атрактора породженого хаотизацією пружної системи металообробного верстата (Fig. 1. The appearance of the reconstructed attractor generated application of chaos elastic system of machine tools)

Теоретичні дослідження проілюстрували, що перехід від ламінарного руху частинок матеріалу, який обробляють в прирізцевих шарах до вихровому, тобто динамічному хаосу, може бути обумовлений утворенням тут солітонів. Їх формування при різанні відбувається при низьких значеннях коефіцієнта тертя на передній поверхні інструменту і високому питомому нормальному тиску.

2. Застосування теорії нейронних мереж в моделюваннях процесів механічної обробки

Штучні нейронні мережі є новітньою перспективною обчислювальною технологією, що дає нові підходи до дослідження задач цифрового виробництва. На початках нейронні мережі відкрили нові можливості в області розпізнавання образів, потім вони дозволили розширити апарат статистичної обробки даних та засобів підтримки прийняття рішень і вирішення задач в різних областях техніки, які ґрунтуються на методах штучного інтелекту.

Здатність до моделювання нелінійних процесів, роботи з зашумленими даними і адаптивність дають можливості застосовувати нейронні мережі для вирішення широкого класу задач. Застосування нейронних мереж охоплюють найрізноманітніші галузі інтересів: розпізнавання образів, обробка зашумлених даних, доповнення образів, асоціативний пошук, класифікація, оптимізація, прогноз, діагностика, обробка сигналів, абстрагування, управління процесами, сегментація даних, стиснення інформації, складні відображення, моделювання складних процесів, машинний зір, розпізнавання мови тощо.

Розглянемо управління процесами механічної обробки в цифрових машинобудівних виробництвах на основі нейронних мереж. Це можливо лише на основі вивчення явищ, що супроводжують процес пластичної деформації металів і автоколивань при різанні металів. При цьому необхідно зазначити, що перспективним напрямком комплексного вивчення процесів ошуркоутворення, динаміки різання і механізму утворення поверхневого шару заготовки є системний енергетичний підхід [13], згідно з яким процес механічної обробки слід розглядати як систему дисипативних процесів [14], що описується енергетичним рівнянням:

$$A_p = A_{\dot{a}\delta} + A_{\delta \delta(\zeta)} + A_{\delta \delta(i)} + A_{i \delta \delta}, \quad (1)$$

де A_p – робота різання, $A_{\dot{a}\delta}$ – робота деформації в області зсуву, $A_{\delta \delta(\zeta)}$ та $A_{mp(n)}$ – робота сили тертя передньої та задньої грані інструмента відповідно, $A_{i \delta \delta}$ – робота, яка витрачається на руйнування наросту. Кожна з компонент системи має свої властивості і характер поведінки. Якщо всі можливі прояви системи зводяться до суми проявів її компонент, то така система є простою. Для опису простих систем традиційно застосовуються методи аналізу, суть яких в послідовній декомпозиції системи на компоненти і побудові моделей все більш простих елементів. Таким в своїй основі є метод математичного моделювання, в якому моделі описуються в формі рівнянь, а прогнозування поведінки системи ґрунтується на їх розв’язках.

Прикладом такого підходу до формалізації процесу різання слугують широко поширені в даний час математичні моделі механічної обробки (рис. 2), засновані на емпіричних ступеневих залежностях вихідних характеристик процесу різання від параметрів режиму і геометрії інструменту:

$$A(v, s, t, \phi, \phi_1, \dots) = C_A v^\alpha s^\beta t^\gamma \phi^k \phi_1^\eta \dots k_1 k_2 \dots k_n.$$



Рис. 2. Схема процесу різання у вигляді системи дисипативних процесів
(**Fig. 2.** Scheme of the cutting process in the form of a system of dissipative processes)

Універсальну методіку побудови нейромережних моделей процесу механічної обробки на базі штучної нейронної мережі зустрічного поширення можна описати таким способом:

Крок 1. Формування навчальної вибірки, що характеризує широкий спектр умов протікання технологічного процесу і складається з векторів $\Psi(\tau_i)$ доступної для фізичного вимірювання діагностичної інформації про процес i , відповідних їм, векторів вихідних параметрів процесу $P(\tau_i)$.

Крок 2. Узагальнення і класифікація вхідних образів $\Psi(\tau_i)$ діагностичної інформації з метою визначення множини $\Theta(\Psi)$ можливих фазових станів технологічного процесу шляхом самонавчання шару Кохонена.

Крок 3. Зіставлення кожного окремо взятого фазового стану Θ_k процесу з найбільш ймовірними значеннями його вихідних параметрів P'_k шляхом навчання шару Гроссберга [7].

Оцінка миттєвих значень залежних параметрів різання ґрунтується на структурно-енергетичному представленні процесу механічної обробки в вигляді системи дисипативних процесів, що описуються енергетичним рівнянням (1). Задача моделювання кожного з параметрів (1) зводиться до створення навчальної вибірки сигналів, що характеризує фазові переходи процесу різання (явні або розмиті) у зв'язку зі зміною контрольованої величини, і відповідного навчання нейронної мережі.

При застосуванні нейромережних моделей, насамперед постає питання вибору конкретної архітектури мережі (числа шарів і кількості нейронів в кожному з них). Після чого відбувається процес навчання мережі, який по суті є підгонкою моделі, яка реалізується мережею, до наявних навчальних даних, які характеризують різні варіанти умов протікання технологічного процесу, що моделюється. Помилка для конкретної конфігурації мережі визначається шляхом прогону через мережу всіх наявних спостережень вхідних параметрів U процесу і порівняння вихідних значень W_i моделі з реальними значеннями вихідних параметрів W технологічного процесу. Всі такі різниці сумуються так звану функцією помилок, значення якої і є помилка мережі. Навчання проводиться до тих пір, поки помилка мережі не досягне прийнятно малої величини (рис. 3).

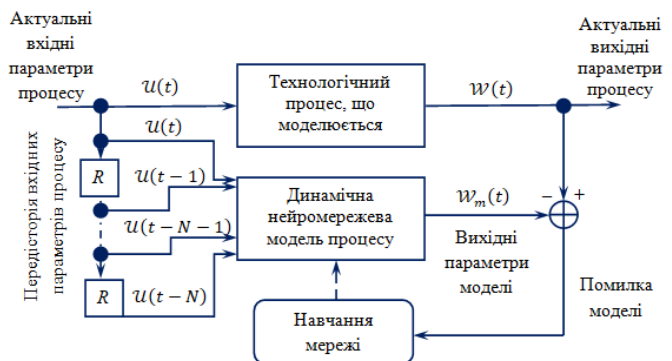


Рис. 3. Схема навчання динамічної нейромережевої моделі технологічного процесу
(**Fig. 3.** Scheme of dynamic learning neural network model of the process)

Мережа, отримана в результаті навчання, виражає закономірності, що присутні в даних. При такому підході вона є функціональним еквівалентом залежностей між змінними, подібної до тих, які будуються в традиційному моделюванні. Однак, на відміну від традиційних моделей, у випадку мережі ці залежності не можуть бути записані в явному вигляді. Часто нейронні мережі реалізують моделі дуже високої якості; однак, вони представляють собою типовий приклад нетеоретичного підходу до дослідження. При такому підході основні зусилля зосереджуються виключно на практичний результат – в даному випадку – на адекватності моделі, – а не на суті механізмів, що лежать в основі явища.

На практиці не завжди є можливим здійснити повне моделювання всього технологічного процесу. У цьому випадку корисно побудувати модель будь-

якої його складової частини, найбільш важливою з точки зору вихідних параметрів процесу або найменш зручною для прямих вимірювань і, як правило, внаслідок цього мало вивчену. Такі часткові моделі можуть бути корисні для діагностики технологічного процесу в цілому. Природно, що вхідними даними для даних моделей буде не вектор $U(t)$ управління, а вектор $\Psi(t)$ будь-яких проміжних параметрів протікання технологічного процесу, отриманих в результаті фізичних вимірювань. Наприклад, використання динамічної нейромережевої моделі коливальної системи «інструмент-деталь» металорізального верстата дозволяє здійснити ефективний спосіб діагностики вібрацій, які самозбуджуються в процесі різання. Інформацію про відносні вібрації інструменту і оброблюваної деталі можна отримати тільки в результаті непрямих вимірювань.

Основне завдання аналізу подібних даних полягає у визначенні якісних і кількісних характеристик реєстрованих сигналів, дозволяють судити про справжній стан динамічних процесів, що відбуваються в зоні різання. Відтак ми маємо зручний інструментарій діагностики функціональної стійкості робочого центру технологічного процесу, який дозволяє виявити несправності роботи агрегату, що дозволить локалізувати несправність і зрештою вчинити дії для продовження функціонування до моменту завершення відповідної технологічної операції.

Визначення параметрів технологічної системи, що забезпечують стійкий режим функціонування за призначенням (механічної обробки), є актуальним завданням. У реальному виробництві визначення оптимальних значень режимів обробки і налагодження верстата проводиться з використанням довідників і досвіду технолога. Однак довідковий матеріал часто дає тільки приблизні розрахунки параметрів налагодження верстата і не враховує динамічні характеристики верстатів, які можуть значною мірою відрізнятися один від одного. Вирішенням цієї проблеми може бути розробка індивідуального динамічного паспорта верстата (робочого центру), що дозволяє в автоматизованому режимі визначити оптимальні режими роботи і його налагодження.

Реальна технологічна система описується великою кількістю параметрів, які в тій чи іншій мірі впливають на вихідні параметри системи різання, такі як вібрації, температури, сили, деформації, які, в свою чергу, визначають продуктивність роботи і якість обробленої поверхні. Облік всіх параметрів в моделі технологічного процесу не представляється можливим. Як правило, в будь-якій складній ієрархічній дисипативній системі, з позиції синергетичного підходу, існують параметри порядку, що визначають поведінку всієї системи в цілому.

Для виявлення закономірностей між вхідними параметрами процесу різання на основі експериментальних даних (режим різання, опрацьований матеріал, спосіб закріплення заготовки, геометрія інструменту, геометричні параметри заготовки) та вихідними (амплітуда, частота, фрактальна розмірність атратора) в [13] застосовувалася рекурентна нейронна мережа, адаптована під регресійний ана-

ліз. Після навчання створювалася регресійна нейромережева модель процесу різання, що дозволяє моделювати будь-які поєднання вхідних параметрів процесу різання і аналізувати значення вихідних, тим самим визначати запас і область стійкості системи в широкому діапазоні її налагодження. Вхідний шар нейронної мережі складається з 21 основних нейронів, на які надходить інформація про вектор St і додаткових нейронів, на які надходять значення вектора попереднього динамічного стану Sd^{-1} з вихідних нейронів по каналу зворотного зв'язку. Тим самим нейромережева модель враховує поточні умови обробки, а також попередній динамічний стан, що значно підвищує точність при моделюванні. Вихідний шар складається з 4 основних нейронів, які характеризують вектор поточного динамічного стану процесу різання Sd , що містить відомості про амплітуду автоколиваний, фрактальної розмірності атратора, ентропії сигналу, старшого показника Ляпунова та 10 000 додаткових нейронів, кожен з яких відповідає за певну частоту в спектрі. Навчання нейронної мережі реалізується методом зворотного поширення помилок.

З огляду на велику кількість даних в оцифрованому сигналі акустичної емісії (рис.4), актуальною стає проблема продуктивності навчання і роботи нейронної мережі. Сучасним підходом до підвищення її продуктивності є технологія паралельного обчислення. Розпаралелювання можна здійснювати, як на ядрах центрального процесора, так і з використанням ядер графічного процесора. У задачах спектрального аналізу з подальшим навчанням нейронної мережі доцільно розбити частотний спектр сигналу на певні зони, наприклад зону високих частот (HF), зону середніх частот (MF), зону низьких частот (LF). Даний підхід дозволяє здійснювати окреме навчання нейронної мережі для високих частот (HFNN), середніх частот (MFNN) і низьких частот (LFNN) на трьох окремих ядрах центрального процесора паралельно.

Для підвищення продуктивності обчислень варто інтегрувати в систему управління виробним центром технологічного процесу завдяки підвищенню продуктивності роботи нейронних мереж і швидкості їх навчання, пропонується використання ядер графічних процесорів і технологію NVIDIA CUDA. Технологія CUDA – це архітектура паралельних обчислень від NVIDIA, що дозволяє істотно збільшити обчислювальну продуктивність завдяки використанню GPU (графічних процесорів).

3. Інтелектуальна система аналізу та прогнозування динамічної стійкості технологічного процесу різання з використанням паралельних обчислень NVIDIA CUDA та хмарних технологій

Розробка динамічного паспорта робочого центру технологічного процесу на основі нейронних мереж з алгоритмом паралельного навчання дозволяє визначати області динамічної стійкості процесу різання на конкретному обладнанні і призначати оптимальні режими обробки і налагодження робочого центру.

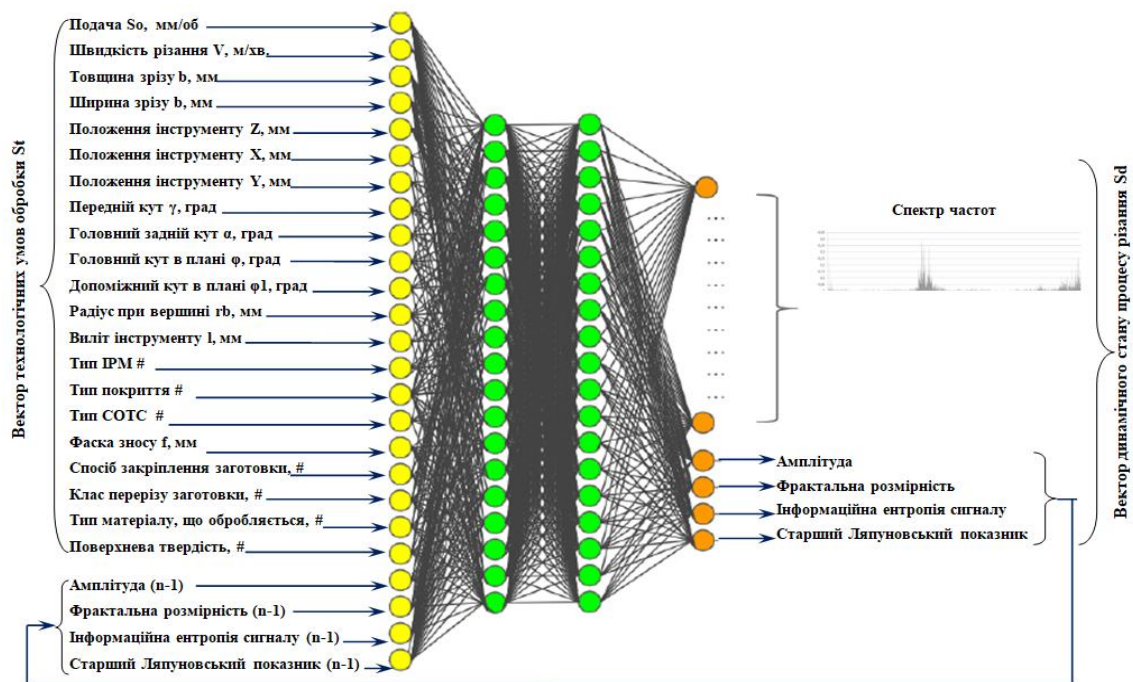


Рис. 4. Нейромережева модель технологічного процесу різання
(Fig. 4. Neural network model of the technological process of cutting)

Підходи нелінійної динаміки, дають можливість будувати атрактори системи різання і проводити оцінку їх фрактальної розмірності, так само дозволяють виявляти хаотичні автоколивання при різанні і втрату стійкості системи різання. Використання алгоритмів паралельних обчислень NVIDIA CUDA істотно прискорює процес навчання нейронної мережі, що дозволяє застосовувати їх в системах оперативної діагностики динамічної стійкості технологічних систем на виробництві.

До складу сучасних інтелектуальних систем, інтегрованих в управління технологічним процесом входить база даних (БД) динамічного стану процесу різання, нейронна мережа стійкості процесу різання, нейронна мережа класифікації перерізів деталі, що обробляється і програмне забезпечення для аналізу сигналу. БД містить відомості про вектор технологічних параметрів St і відповідний вектор динамічного стану Sd , отриманого в ході експериментальних дослідження або роботи обладнання [13]. Після накопичення певної кількості інформації в БД, відбувається навчання нейромережевої моделі стійкості процесу різання, яка пов'язує значення вектора технологічних параметрів St з відповідними значеннями вектора динамічного стану процесу різання Sd (рис.5). Вхідний шар нейронної мережі складається з 13 нейронів, на вхід яких надходить інформація про вектор технологічних параметрів St . Вихідний шар складається з 4 основних нейронів, які характеризують вектор динамічного стану процесу різання Sd , що містить відомості про амплітуду автоколивань, фрактальної розмірності атрактора, ентропії сигналу, старшого показника Ляпунова та 10 000 додаткових нейронів, кожен з яких відповідає за певну частоту в спектрі. Навчання нейронної мережі відбувається методом зворотного поши-

рення помилки. З огляду на великий обсяг даних, що надходять, застосовуються підходи паралельних обчислень з використанням графічних процесорів (GPU) і технології NVIDIA CUDA, зокрема спеціалізована бібліотека cuDNN, що дозволяє підвищити продуктивність при навчанні в 5-7 разів.

Облік впливу форми заготовки на вектор динамічного стану процесу різання, здійснюється з використанням її 3D моделі. На основі булевої операції віднімання, з 3D моделі робочого простору робочого центру, обмеженого призматичним твердим тілом, віднімається 3D модель заготовки. Потім через інтервал dz будуються поперечні перерізи утвореної фігури. Отримані перерізи покриваються сіткою з комітками розміру dx . Комітки, в яких відсутнє тверде тіло, внаслідок булевої операції віднімання, приймають значення «1», а комітки, в яких присутнє тверде тіло, значення «0». З отриманих значень комірок формується матриця, яка відображає геометричні особливості деталі в конкретному перетині і місці робочого простору робочого центру. Отримана матриця надходить на вхід штучної нейронної мережі, яка на основі алгоритму самонавчання Кохонена формує класи перерізів. Отримані класи перерізів записуються в БД і застосовуються в процесі навчання нейромережевої моделі стійкості (функціональної стійкості) процесу різання.

Після навчання нейронна мережа здатна моделювати динамічний стан процесу різання, формуючи на вихідному шарі нейронів вектор динамічного стану процесу різання Sdm на основі даних про вектор технологічних параметрів Stm . Змінюючи значення вектора Stm , можливе моделювання різних динамічних станів, для подальшого вибору технологічних параметрів, які забезпечують найбільш динамічно стійкі режими різання, тим самим підви-

щується ефективність механічної обробки, а відтак забезпечується функціональна стійкість технологічного процесу, який виконується з використанням даного робочого центру як елемента.

Розроблена інтелектуальна система діагностики і управління динамічною стійкістю процесу різання, може бути реалізована на основі моделювання обробки на виробничому центрі для різання металів з твёрдосплавним металообробним інструментом (рис. 5). При цьому варто щоб на вхід нейроме-

режевої моделі надходив вектор технологічних параметрів Stm ($V = 1$ м/с, $t = 4$ мм, $S_0 = 0.1$ мм/об.), А на виході штучної нейронної мережі формується відповідний вектор динамічного стану процесу різання Sdm . В якості змінної складової вектора Stm , можна вибрати величину Z – положення супорта верстата по осі Z мм, яка може змінюватися з кроком 0.01 мм в межах, наприклад, від 0 до 350 мм. Такий прийом дозволяє формувати вектор Sdm протягом всієї обробки заготовки.

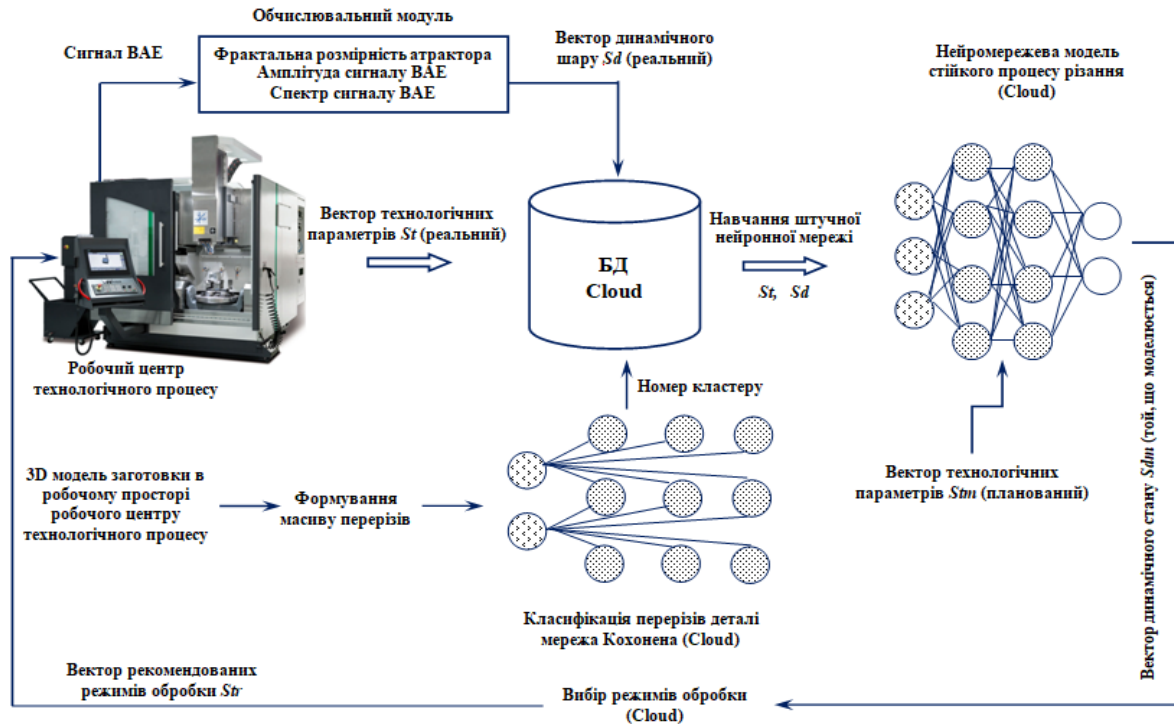


Рис. 5. Принципова схема інтелектуальної системи діагностування і управління динамічною стійкістю технологічного процесу різання
(Fig. 5. Schematic diagram of an intelligent system for diagnosing and managing the dynamic stability of the cutting process)

Підсумовуючи слід зазначити, що запропонована інтелектуальна система діагностування та управління динамічною стійкістю технологічного процесу різання є необхідною умовою забезпечення функціональної стійкості виробничого процесу.

Забезпечення ж практичного дотримання параметрів моделі в рамках реального виробничого процесу гарантуватиме його функціональну стійкість в межах часового інтервалу поки параметри технологічного центру задовольнятимуть розрахункові параметри моделі. Система стане функціонально нестійкою при виході параметрів за межі множини розрахункових параметрів, що приведе до втрати динамічної стійкості робочого центру й вимагатиме зупинку технологічного процесу або ж його корекції, заміни інструменту, режимів роботи тощо.

Висновки

Процеси трансформації глобальної інформаційної інфраструктури та масштабної автоматизації виробництва призводять до фактичного злиття автоматизованого виробництва, обміну даних і вироб-

ничих технологій в єдину саморегульовану систему з якнайменшим або взагалі відсутнім втручанням людини у виробничий процес. Нині відбувається масове впровадження кіберфізичних систем у виробництво з одночасним застосуванням отриманих результатів в галузях штучного інтелекту, робототехніки, Інтернету речей тощо.

Реалізуючи досягнення мети роботи в частині розробки методів організації виробничих процесів обробки металів на машинобудівних підприємствах та підприємствах гірничо-металургійного комплексу з використанням нейромереж було вивчено процеси глобальної трансформації інфраструктури ІТ на фоні масового впровадження кіберфізичних систем та проривних відкриттів в галузях штучного інтелекту і робототехніки у виробництво та технологічні процеси.

В статті описано характеристики поведінки складних технічних систем, що реалізують властивість функціональної стійкості таких систем. Дано характеристику особливостей процесу обробки металів різанням з врахуванням особливостей впливу

деформаційного зміцнення, пластичних деформацій, автоколивань та хаотичної динаміки, які виникають в обробляючих центрах. Описано способи застосування нейромереж в моделюваннях процесів механічної обробки металів різанням.

Дано універсальну методику побудови нейромережних моделей процесу механічної обробки на базі штучної нейронної мережі зустрічного поширення. Ґрунтуючись на проведеному аналізі досліджено інтелектуальну систему аналізу та прогнозування динамічної стійкості технологічного процесу різання

з використанням паралельних обчислень, яка гарантує виконання необхідних умов забезпечення функціональної стійкості виробничого процесу.

В подальшому планується продовжити дослідження функціонально стійких технологічних процесів з використанням методів штучного інтелекту. Основна увага буде сконцентрована на моделюванні таких процесів з врахуванням особливостей середовища функціонування, матеріалів які використовуються та впливу фізичних процесів, які супроводжують відповідні технологічні процеси.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Собчук В.В., Мусієнко А.П., Ільїн О.Ю. Аналіз використання ієрархічної структури для забезпечення функціональної стійкості автоматизованої системи управління підприємством // Науковий журнал «Телекомунікаційні та інформаційні технології». — К.: ДУТ, 2018. № 4 (61). С. 53 – 61.
2. Собчук В.В., Коваль М.О., Мусієнко А.П., Мацько О.Й. Метод діагностування прихованих відмов в інформаційній системі на основі застосування дворівневої системи забезпечення функціональної стійкості // Науковий журнал «Телекомунікаційні та інформаційні технології». — К.: ДУТ, 2019. — № 1 (62). — С. 22 – 31.
3. Барабаш О.В., Лукова-Чуйко Н.П., Мусієнко А.П., Собчук В.В. Забезпечення функціональної стійкості інформаційних мереж на основі розробки методу протидії DDoS-атакам // Сучасні інформаційні системи. — Харків: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2018. — Том 2. — № 1. — С. 56–63.
4. Собчук В.В., Лаптев О.А., Саланда І.П., Сачук Ю.В. Математична модель структури інформаційної мережі на основі нестационарної ієрархічної та стаціонарної гіпермережі // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. — К.: ВІКНУ, 2019. — Вип. 64. — С. 124 – 132.
5. Кучук Н.Г., Лукова-Чуйко Н.В., Собчук В.В. Оптимізація пропускних здатностей каналів зв'язку гіперконвективної системи // Системи управління, навігації та зв'язку. — Полтава: ПНТУ, 2019. — Вип 3 (55). — С 120–125.
6. Собчук В.В. Методика створення єдиного інформаційного простору на виробничому підприємстві з функціонально стійким виробничим процесом // Системи управління, навігації та зв'язку. — Полтава: ПНТУ, 2019. — Вип. 6 (58). — С. 84–91.
7. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
8. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. – М.: Мир, 1992. – 184 с.
9. Funahashi K. On the approximate realization of continuous mapping by neural networks. – Vol.2. – 1982. – P. 183–192.
10. Hornik K., Stinchcombe M., White H. Multilayer feed-forward networks are universal approximators, *Neural Networks*. – Vol.2. – 1989. – P 359–366.
11. Chan C.W., Hong Jin, Chueng K.C., Zhang H.Y. Fault detection of system with redundant sensors using constrained Kohonen networks // *Automatica*. – Vol. 37. – 2001. – P. 1671 – 1676.
12. Jamsa-Jounela S.-L. A process monitoring system based on the Kohonen self-organizing maps // *Control Engineering Practice*. – Vol. 11. – 2003. – N 11. – P. 83–92.
13. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Колчин П.В., Кузьмишина А.М., Аносов М.С. Искусственный интеллект и киберфизические механообрабатывающие системы в цифровом производстве. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.А.Алексеева. 2018. – 271 с.
14. Пічкур В.В., Капустян О.В., Собчук В.В. Теорія динамічних систем. – Луцьк: Вежа-друк, 2020. – 348 с.

REFERENCES

1. Sobchuk V. V., Musienko A. P., Ilyin O. Y. (2018), "Analysis of the use of a hierarchical structure to ensure the functional stability of the automated enterprise management system", *Telecommunication and information technologies*, K.: DUT, No. 4 (61), pp. 53-61.
2. Sobchuk V. V., Koval M. O., Musienko A. P., Matsko O. Y. (2019), "Method of diagnosing hidden failures in the information system based on the use of a two-level system of functional", *Telecommunication and information technologies*, K.: DUT, No. 1 (62), pp. 22-31.
3. Barabash O. V., Lukova-Chuyko N. P., Musienko A. P., Sobchuk V. V. (2018), "Ensuring the functional stability of information networks based on the development of a method of counteracting DDoS attacks", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 56-63.
4. Sobchuk V. V., Laptev O. A., Salanda I. P., Sachuk Y. V. (2019), "Mathematical model of information network structure on the basis of non-stationary hierarchical and stationary hypernetwork", *Collection of scientific works of the Military Institute of Kyiv Taras Shevchenko National University*, K.: WINDOW, Issue 64, pp. 124-132.
5. Kuchuk N. G., Lukova-Chuiko N. V., Sobchuk V. V. (2019), "Optimization of bandwidth of communication channels of hyperconvective system", *Control, navigation and communication systems*, Poltava: PNTU, No. 3 (55), pp. 120-125.
6. Sobchuk V. V. (2019), "Methods of creating a single information space at a production enterprise with a functionally stable production process", *Control, navigation and communication systems*, Poltava: PNTU, No. 6 (58), pp. 84-91.
7. Osovsky S. (2002), *Neural networks for information processing*, M.: Finance and statistics, 344 p.
8. Wasserman F. (1992), *Neurocomputer technology: Theory and practice*, M.: Mir, 184 p.
9. Funahashi K. On the approximate realization of continuous mapping by neural networks. – Vol.2. – 1982. – P. 183-192.
10. Hornik K., Stinchcombe M., White H. (1989), "Multilayer feed-forward networks are universal approximators", *Neural Networks*, Vol. 2, pp. 359-366.
11. Chan C.W., Hong Jin, Chueng K.C., Zhang H.Y. (2001), "Fault detection of system with redundant sensors using constrained Kohonen networks", *Automatica*, Vol. 37, pp. 1671-1676.

12. Jamsa-Jounela S.-L. (2003), "A process monitoring system based on the Kohonen self-organizing maps", *Control Engineering Practice*, Vol. 11, pp. 83-92.
13. Kabaldin Yu. G., Shatagin D. A., Kolchin P. V., Kuzmishina A. M., Anosov M. S. (2018), *Artificial intelligence and cyber-physical machining systems in digital manufacturing*, Nizhny Novgorod: NSTU im. R.A. Alekseeva, 271 p.
14. Pichkur V. V., Kapustyan O. V., Sobchuk V. V. (2020), *The theory of dynamical systems*, Lutsk: Vezha-druk, 348 p.

Received (Надійшла) 11.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.04.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Собчук Валентин Володимирович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри вищої математики, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна;

Valentyn Sobchuk – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of High Mathematics, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine;

e-mail: v.v.sobchuk@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4002-8206>.

Замрій Ірина Вікторівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри вищої математики, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна;

Iryna Zamrii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of High Mathematics, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine;

e-mail: irinafraktal@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5681-1871>.

Олімпієва Юлія Ігорівна – старший викладач кафедри вищої математики, Державний університет телекомунікацій;

Yuliya Olimpiyeva – Senior lecturer of High Mathematics Department, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine;

e-mail: evanaolimp@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8686-4966>.

Лаптев Сергій Олександрович – кафедра вищої математики, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна;

Serhii Laptiev – Department of High Mathematics, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine;

e-mail: alaptiev64@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7291-1829>.

Функциональная устойчивость технологических процессов на основании нелинейной динамики с использованием нейросети

В. В. Собчук, И. В. Замрий, Ю. И. Олимпиева, С. А. Лаптев

Аннотация. В работе исследуются процессы глобальной трансформации инфраструктуры информационных технологий на фоне массового внедрения киберфизических систем и прорывных достижений в области искусственного интеллекта и робототехники в производство и технологические процессы. Изучаются свойства поведения сложных технических систем, реализующих свойство функциональной устойчивости таких систем. Характеризуются процессы обработки металлов резанием с учетом особенностей влияния деформационного упрочнения, пластических деформаций, автоколебаний и хаотической динамики, которые возникают в обрабатываемых центрах. Описаны способы применения нейросетей в моделировании процессов механической обработки металлов резанием. Дано универсальную методику построения нейросетевых моделей процесса механической обработки на базе искусственной нейронной сети встречного распространения. Основываясь на проведенном анализе исследована интеллектуальная система анализа и прогнозирования динамической устойчивости технологического процесса резания с использованием параллельных вычислений, которая гарантирует выполнение необходимых условий обеспечения функциональной устойчивости производственного процесса.

Ключевые слова: технологический процесс; диссипативные системы; функциональная устойчивость; нейронная сеть; сеть Кохонена.

Functional stability of technological processes based on nonlinear dynamics with the application of neural networks

Valentyn Sobchuk, Iryna Zamrii, Yuliya Olimpiyeva, Serhii Laptiev

Abstract. The processes of transformation of global information infrastructure and large-scale automation of production lead to the actual merger of automated production, data exchange and production technologies into a single self-regulatory system with minimal or no human intervention in the production process. Currently, there is a mass introduction of cyberphysical systems into production with the simultaneous application of the results obtained in the fields of artificial intelligence, robotics, the Internet of Things and so on. Implementing the goal of developing methods for organizing production processes of metal processing at machine-building enterprises using neural networks, the processes of global transformation of IT infrastructure were studied against the background of mass introduction of cyberphysical systems and breakthroughs in artificial intelligence and technological processes. The characteristics of the behavior of complex technical systems that implement the property of functional stability of such systems are studied. The processes of metal processing by cutting are characterized taking into account the peculiarities of the influence of deformation hardening, plastic deformations, self-oscillations and chaotic dynamics that occur in machining centers. Methods of application of neural networks in modeling of processes of mechanical processing of metals by cutting are described. A universal technique for constructing neural network models of the machining process on the basis of an artificial counter-propagation neural network is given. Based on the analysis, an intelligent system of analysis and forecasting of the dynamic stability of the technological process of cutting using parallel calculations, which guarantees the fulfillment of the necessary conditions to ensure the functional stability of the production process.

Keywords: technological process; dissipative systems; functional stability; neural network; Kohonen network.

Methods of information systems synthesis

УДК 528.855

DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.09>С. М. Андрєєв¹, В. А. Жилін¹, А. Л. Сабадош²¹ Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна² Національний центр управління та випробувань космічних засобів, Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ПАСАЖИРОПОТОКІВ В АЕРОПОРТАХ В УМОВАХ КАРАНТИННОГО ЗОНУВАННЯ

Анотація. Предметом дослідження є розроблення методики побудови WEB-сервісів на основі картографічних моделей аеропортів для організації пасажиропотоків в умовах карантинного зонування. **Об'єктом дослідження** є процес організації пасажиропотоків в аеропортах. **Метою роботи** є покращення організації пасажиропотоків в аеропортах в умовах карантинних обмежень за рахунок використання WEB-сервісів на основі картографічних моделей будівель аеропортів. **Висновки.** На підставі проведеного аналізу діяльності аеропортів світу за останні п'ять років виявлено стійку тенденцію до збільшення кількості авіарейсів, а отже — збільшення пасажиропотоків в аеропортах. Також проаналізовано прогнози щодо тенденцій розвитку повітряного руху в Європі в найближчі п'ять років, які свідчать про напрямок зростання авіаперевезень. Проведено аналіз впливу карантинних обмежень у зв'язку з розповсюдженням COVID-19, який показав, що не дивлячись на значне зниження пасажиропотоків в аеропортах світу в зв'язку з карантинними обмеженнями, буде спостерігатися значне зростання пасажиропотоків після карантинного послаблення. На підставі зазначеного, зроблено висновок, що нагальним є покращення організації пасажиропотоків в аеропортах в умовах карантинних обмежень за рахунок використання WEB-сервісів на основі картографічних моделей будівель аеропортів. Разом з тим, проведено аналіз доцільності застосування ГІС-технологій в аеропортах, а також огляд сучасних інформаційних технологій, що у теперішній час використовуються для організації роботи аеропортів в умовах карантинного зонування. Розроблено методику побудови маршрутів для організації пасажиропотоків в аеропортах в умовах карантинного зонування. Методика передбачає створення карт маршрутів пасажиропотоків в аеропортах з використанням найсучасніших картографічних програмних продуктів ArcGIS та ArcGIS Online, містить рекомендації щодо застосування білінгової Wi-Fi мережі для відстеження пересування пасажирів у будівлях аеропортів, і, врешті, передбачає створення WEB-сервісів для картографічних моделей терміналів аеропортів. Розроблені із застосуванням запропонованої методики WEB-сервіси для організації пасажиропотоків в аеропортах в умовах карантинного зонування є зручними та ергономічними щодо використання робітниками аеропортів та авіакомпаній. Тим більш, пасажирів також можуть оперативнo отримувати часткову інформацію, достатню для організації свого руху в терміналі аеропорту згідно з карантинними обмеженнями.

Ключові слова: геоінформаційні системи; картографічні моделі аеропортів; WEB-сервіси; карантинне зонування; організація пасажиропотоків.

Вступ

Для якісної і безперебійної роботи аеропорту необхідна злагоджена робота багатьох підрозділів і служб, які у разі виникнення проблемних ситуацій повинні швидко вживати заходів щодо їх ліквідації. Чисельність підрозділів і служб може змінюватися в залежності від добової завантаженості терміналів.

Умови карантинного зонування через вірусну пандемію COVID-19 пред'являють додаткові специфічні вимоги до процесу організації пасажиропотоків і роботи служб аеропорту. Отже нагальним є застосування системи прийняття рішень щодо підвищення якості обслуговування пасажирів і, в тому числі, визначення кількості необхідного службового персоналу. При дослідженні пасажирських потоків на території аеропорту особливу значимість мають архітектурні можливості будівель щодо розподілу великої кількості людей, адже в умовах карантинного зонування збільшується час перебування в аеропорту пасажирів, а також тих осіб, що їх проводжають та зустрічають.

Основними тенденціями розвитку сучасних аеропортів є зростання інтенсивності польотів та сезонних пікових навантажень на аеропорт, необхідність

ефективно управляти повітряним рухом, жорсткі вимоги до оптимізації структури і функцій підрозділів аеропортового комплексу. Існуюча інфраструктура в міру збільшення пасажиропотоку може бути не в змозі забезпечити якісне обслуговування пасажирів і відповідну логістику в пікові режими і, як наслідок, вимагає значних інвестицій для реорганізації та реконструкції як самого аеропорту, так і прилеглих до нього територій.

Тому розробка методики застосування геоінформаційних технологій для організації пасажиропотоків в аеропортах в умовах карантинного зонування є актуальною задачею, яку вирішено у даній роботі.

Аналіз пасажиропотоків в аеропортах світу

Протягом останніх п'яти років в цивільній авіації спостерігається стійка тенденція до збільшення кількості рейсів. Виходячи з цього, збільшуються пасажиропотоки в аеропортах світу. Зазвичай пасажиропотоком називають рух пасажирів в одному напрямку маршруту. Характерною особливістю пасажиропотоків є їхня нерівномірність, а саме змінювання за часом (година, доба, день тижня, пора року). Результати аналізу зростання пасажиропотоків у десяти аеропортах світу представлено на рис. 1.

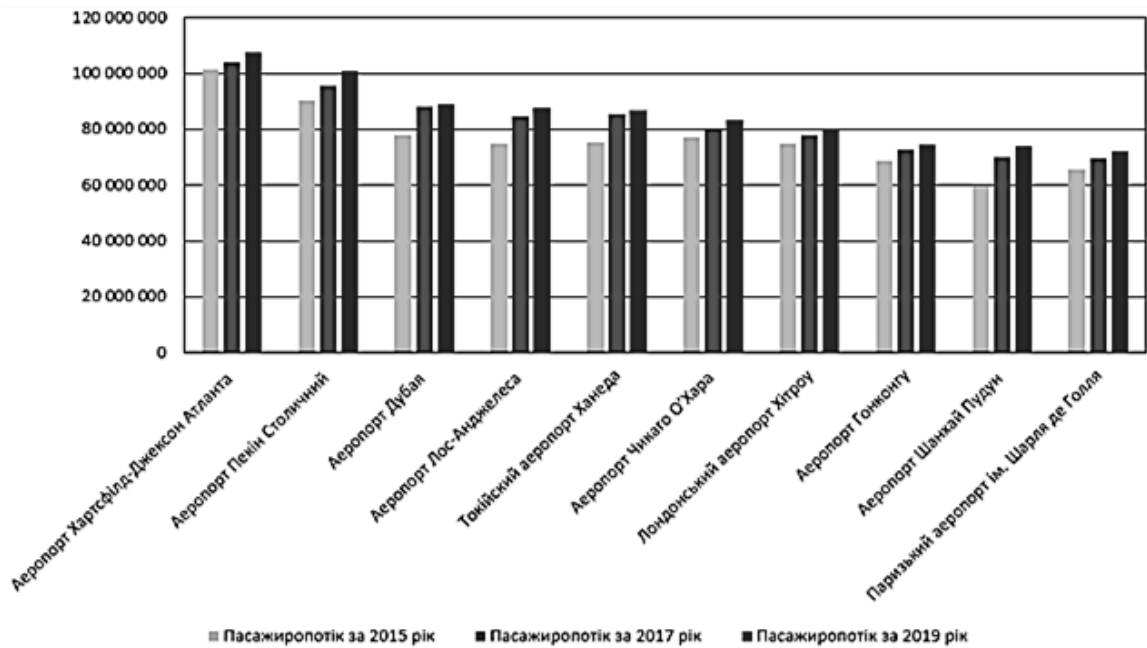


Рис. 1. Діаграма зростання пасажиропотоків в аеропортах світу
(Fig. 1. Diagram of growth of passenger traffic in airports around the world)

В цілому пасажиропотік у всьому світі збільшився до 8,8 мільярда людей. Стрімку динаміку зростання показують найбільші аеропорти світу, але й менші аеропорти також інтенсивно нарощують пасажиропотік. Результати аналізу пасажиропотоків у десяти найзавантаженіших аеропортах світу наведено у вигляді діаграм пасажиропотоків за рік, добу та годину (рис. 2 – 4).

В десятку найзавантаженіших аеропортів світу за 2019 рік входить лише 2 аеропорти Європи — Хітроу (Лондон, Великобританія) та аеропорт ім. Шарля де Голля (Париж, Франція). У 2020 році у зв'язку з карантинними обмеженнями спостерігалось значне зниження пасажиропотоку у порівнянні з попереднім роком. Діаграма порівняння пасажиропотоків в обох аеропортах наведено на рис. 5.

Аеропорт "Хітроу" втратив звання найбільшого в Європі, тому що вперше перестав бути найбільшим аеропортом в Європі за пасажиропотоком, оскільки

його обійшов паризький аеропорт ім. Шарля де Голля. Результати аналізу зниження пасажиропотоків в інших аеропортах Європи наведено на рис.6.

Європейська організація з безпеки повітряної навігації опублікувала прогноз розвитку повітряного руху в Європі в найближчі п'ять років (рис. 7).

У найбільш оптимістичному сценарії прогнозується, що до 2024 року трафік повернеться до рівня 2019 року. Це станеться за умови, якщо вакцина від COVID-19 стане широко доступною для мандрівників до літа 2021 року. Згідно з другим сценарієм, найбільш ймовірним, трафік 2024 року становитиме лише 92% від показника 2019 року. Якщо вакцина стане широко доступною для мандрівників до літа 2022 року, трафік повернеться до рівня 2019 року тільки до 2026 року. У третьому сценарії за неефективної вакцини трафік в 2024 році становитиме 75% від показника 2019 року і не досягне показників 2019 року до 2029 року.



Рис. 2. Діаграма пасажиропотоку за 2019 рік в десяти найзавантаженіших аеропортах світу
(Fig. 2. Diagram of passenger traffic for 2019 in the ten busiest airports in the world)

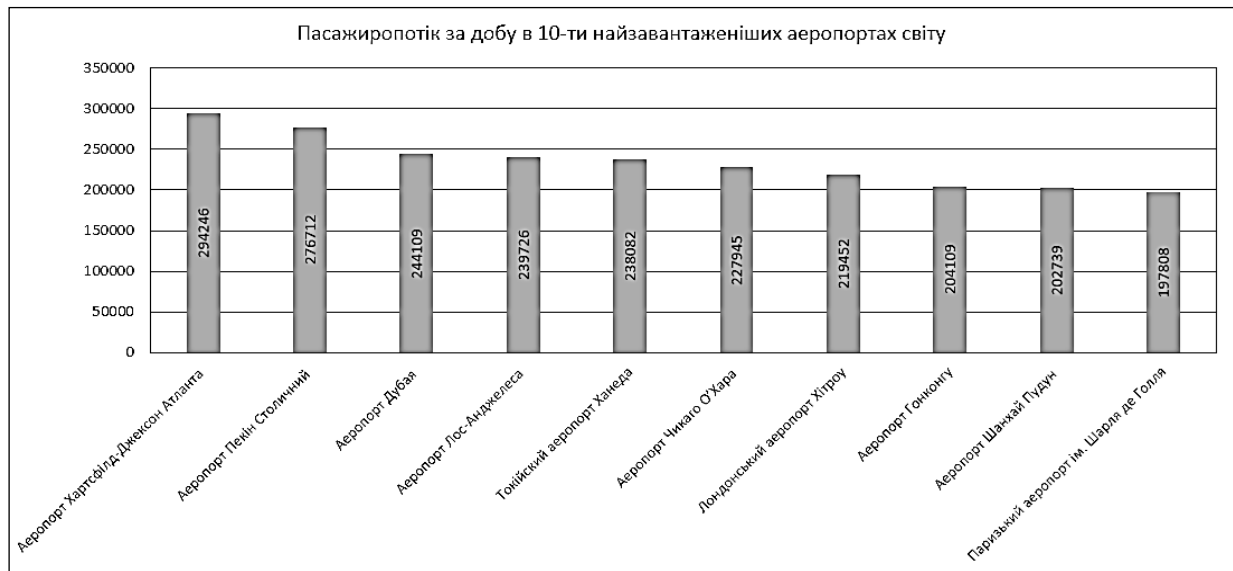


Рис. 3. Діаграма пасажиропотоку за добу в десяти найзавантаженіших аеропортах світу
(Fig. 3. Diagram of passenger traffic per day in the ten busiest airports in the world)

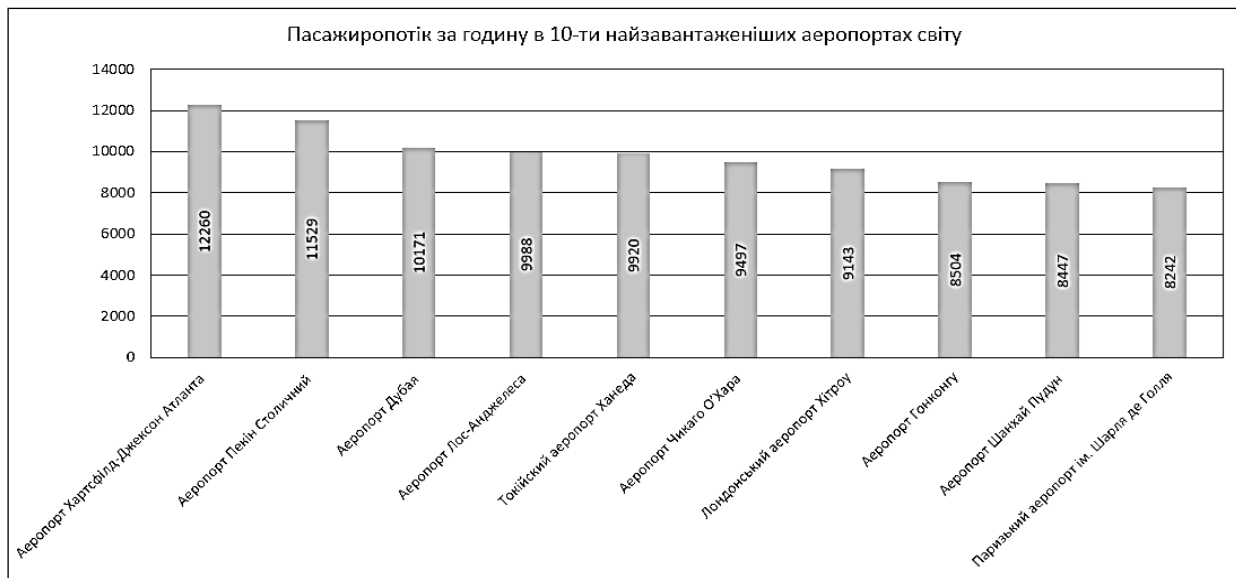


Рис. 4. Діаграма пасажиропотоку за годину в десяти найзавантаженіших аеропортах світу
(Fig. 4. Diagram of passenger traffic per hour in the ten busiest airports in the world)

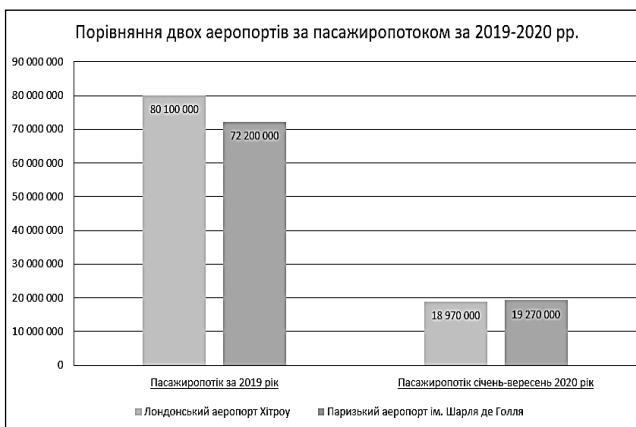


Рис. 5. Діаграма пасажиропотоків в аеропортах Великобританії і Франції у 2019 та 2020 роках
(Fig. 5. Diagram of passenger traffic at the airports of Great Britain and France in 2019 and 2020)

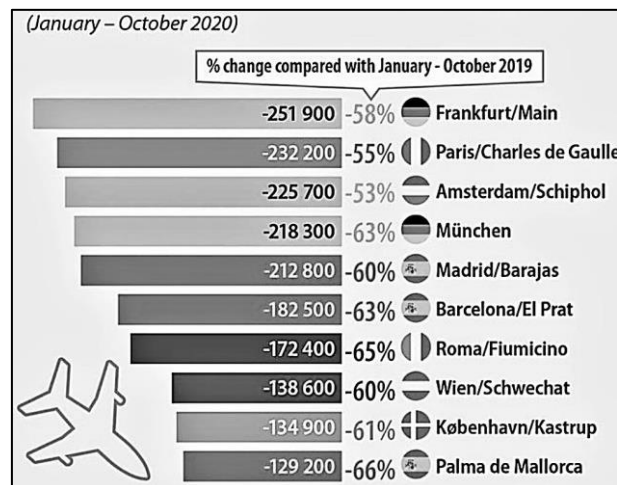


Рис. 6. Зниження пасажиропотоків в аеропортах Європи
(Fig. 6. Reduction of passenger traffic at European airports)

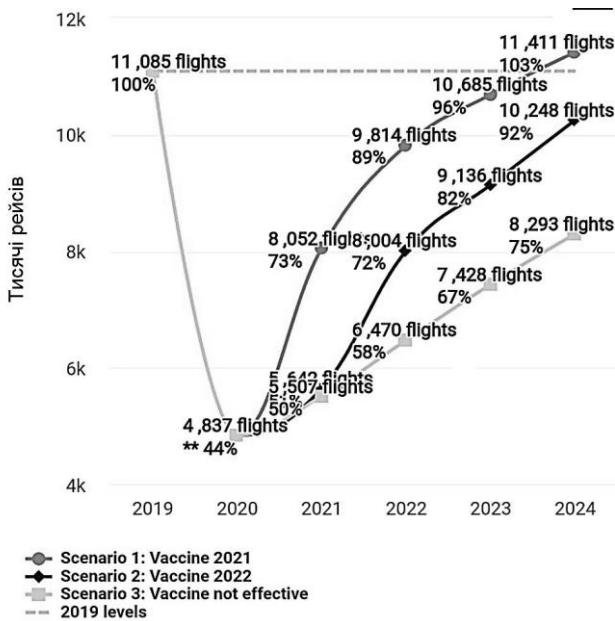


Рис. 7. Прогноз розвитку повітряного руху в Європі в найближчі п'ять років
(Fig. 7. Forecast of air traffic in Europe in the next five years)

Таким чином, не дивлячись на значне зниження пасажиропотоків в аеропортах світу в зв'язку з карантинними обмеженнями, буде спостерігатися значне зростання пасажиропотоку після карантинного послаблення.

На початку 2020 року в світі були введені карантинні обмеження, та найбільшим обмеженням було повне закриття всіх авіасполучень. Але зважаючи на всі негативні наслідки, було прийняте рішення поступово відновлювати авіаперевезення, суворо дотримуючись необхідних санітарних вимог.

Загальні вимоги для пасажирів та персоналу аеропортів, пов'язані з COVID-19 загалом містили такі пункти:

- 1) при вході до терміналу обов'язково вимірювати температуру, а також проводити зовнішню оцінку здоров'я людини;
- 2) усім бути забезпеченими необхідними засобами індивідуального захисту;
- 3) дотримувати соціальну дистанцію між особами в 1,5 метра;
- 4) стійки реєстрації пасажирів мають бути обладнані додатковими захисними екранами;
- 5) у зонах скупчення пасажирів має бути нанесена спеціальна розмітка, яка допоможе дотримуватись соціальної дистанції;
- 6) у терміналах і автобусах аеропорту має проводитись регулярне прибирання з дезінфікуючими засобами (особливу увагу треба приділяти поверхням і обладнанню, з якими пасажирів і співробітники аеропорту контактують найчастіше);
- 7) у зонах скупчення пасажирів мають бути розставлені спеціальні розмежувальні стрічки;
- 8) всі зони терміналу мають бути оснащені санітайзерами;
- 9) всі зали аеропорту мають бути обладнані спеціальними сміттєвими контейнерами для утилізації індивідуальних засобів захисту;

10) у залах терміналів аеропорту пасажирів різними засобами (інформаційні плакати, регулярні голосові оголошення тощо) має бути надана інформація про основні санітарні заходи.

Аналіз доцільності застосування ГІС-технологій в аеропортах

За своєю природою аеропорти є просторовими утвореннями зі складною розвиненою інфраструктурою. Рішення задач планування, модернізації, експлуатації, безпеки, транспортної логістики, організації внутрішнього простору, екології та багатьох інших питань вимагає від керівництва аеропортами знання про точне розташування певних об'єктів та їх взаємозв'язку один з одним.

Технології геоінформаційних систем дозволяють у повній мірі скористатися просторовою інформацією і засобами управління нею, включаючи 3D та 4D (у часі) моделювання для підтримки повсякденної діяльності та стратегічного планування роботи аеропортів. Щодня мільйони прийнятих рішень базуються на інформації про місцезнаходження об'єктів на території аеропортів а, отже, — на картах і планах. У всякому випадку карти і плани допомагають поліпшити взаємодію між авіакомпаніями та їх підрозділами, успішніше вести бізнес, виконувати виробничі операції та інші дії.

Аеропорти мають безліч активів, видів діяльності, служб та інших управлінських завдань, які необхідно планувати, контролювати і відповідно створювати звітні матеріали. Багато в чому аеропорти схожі з містами, мають схожу на міську інфраструктуру, але й свою додаткову специфіку. Основна місія аеропортів полягає в обслуговуванні потоків пасажирів та виконанні вантажоперевезень. Крім того, аеропорти надають велику кількість робочих місць.

Як і в попередні роки, більшість аеропортів (73%) ставлять завдання по обробці даних пасажирів у якості пріоритету для інвестицій в сфері інформаційних технологій.

В табл. 1 наведено результати аналізу щодо використання геоінформаційних технологій в діяльності аеропортів, фотоприкладі – в табл. 2.

ArcGIS, як програмне забезпечення для побудови ГІС будь-якого рівня, дає можливість легко створювати дані, карти, глобуси і моделі в настільних програмних продуктах, публікувати їх та використовувати в різноманітних додатках, WEB-браузерах і мобільних пристроях на основі будь-яких платформ.

Більшість процесів управління даними та їх геообробкою виконується в ArcGIS for Desktop. До складу настільних продуктів ArcGIS Desktop входить інтегрований набір таких програм, як ArcCatalog, ArcMap, ArcGlobe і ArcScene. За допомогою цих застосунків можна виконувати картографування, географічний аналіз, редагування та компіляцію даних, управління даними, їх візуалізацію та геообробку. У той же час серверні ГІС-застосунки використовуються в багатьох типах централізовано керованих ГІС. Саме це надає можливість використання настільних ГІС-застосунків необмеженою кількістю користувачів у локальних та глобальних мережах.

Таблиця 1 – Використання геоінформаційних технологій у функціонуванні аеропортів

№	Приклади ГІС	Назва аеропорту	Задачі, вирішувані з використанням ГІС-технологій
1	ГІС для задачі організації документообігу в структурі аеропорту.	Міжнародний аеропорт ім. Таргуда Маршалла, Балтімор, Вашингтон.	Система управління технічними документами за допомогою квадратів координатної сітки аеропорту.
2	Мобільна ГІС.	Аеропорт Еплі Ейрфілд в Омасі, штат Небраска.	Документує і відображає на карті дефекти покриття ЗПС.
3	WEB-система на основі ArcGIS Server.	Міжнародний аеропорт Гімпу, Південна Корея.	Дозволяє співробітникам аеропорту проводити моніторинг рухомих об'єктів в режимі реального часу.
4	ГІС-портал.	Міжнародний аеропорт Скай Харбор у Феніксі, штат Аризона.	Надає користувачам загальний детальний вид території та поверхневі плани будинків.
5	Корпоративна ГІС.	Аеропорт міста Перт, Австралія.	Містить дані про інфраструктуру аеропорту та навколишні території
6	Екологічні ГІС.	Міжнародний аеропорт Схіпхол, Амстердам.	Оцінка та зниження впливу діяльності аеропорту на навколишнє середовище.
7	3D-модель (цифровий двійник).	Міжнародний аеропорт Схіпхол, Амстердам.	Дає можливість моделювати потенційні збої і нестиковки в роботі по всьому комплексу, в тому числі в системах опалення, вентиляції та кондиціонування повітря в будівлях аеропорту.
8	Накопичення інформації в ArcGIS Online.	Міжнародний аеропорт Хартсфілд-Джексон, Атланта.	Забезпечує безпеку і безперерйну діяльність льотного поля, інформуючи про появу диких тварин і зграй птахів.

Таблиця 2 – Фотоприклад використання геоінформаційних технологій у функціонуванні аеропортів



Разом з тим, мобільні засоби створення та обробки геоданих мають не менш важливе значення, оскільки вони дозволяють перенести ГІС безпосередньо на місцевість діяльності і взаємодіяти з навколишнім цифровим середовищем. До таких засобів, зокрема, відноситься ArcGIS Online – хмарна інфраструктура,

що дозволяє публікувати, зберігати і спільно використовувати геопросторову інформацію (карти, геодані тощо). За допомогою ArcGIS Online користувачі отримують доступ до географічної інформації, яка публікується компанією ESRI, а також ГІС-користувачами в усьому світі.

Використання сучасних інформаційних технологій для організації роботи аеропортів

З самого початку авіаперевезення були нестабільною галуззю. Для авіації першочергове значення має стійкість, що визначається як здатність організації вижити і зберегти працездатність після збоїв. Авіація стикається з незлічними ризиками, і підготуватися до кожного сценарію просто неможливо, але COVID-19 продемонстрував важливість стійкості авіаперевезень та виявив глибокий розрив між тими, хто може адаптуватися, і тими, хто не може.

Отже, гнучка інфраструктура важлива для забезпечення експлуатаційної стійкості, але не менш важливі гнучкі експлуатаційні процедури. При цьому аеропорти залежать від стандартизованого набору керівних принципів для структурування повсякденної діяльності.

Комітетам з реагування на надзвичайні ситуації зазвичай доручається розроблювати плани дій у будь-яких небезпечних ситуаціях. Вони оцінюють потенційні ризики відповідно до ймовірності та серйозності небезпек і формують методи мінімізації їх впливу. Хоча це доцільний підхід, він може застосовуватися тільки до відомих ризиків, спираючись на дані з минулого досвіду. Отримані в результаті плани пом'якшення наслідків небезпек не містять вказівок про те, що робити у разі виникнення чогось несподіваного й незвичайного. Сучасні технології дозволяють пасажиром легко орієнтуватися в аеропортах з декількома терміналами, прискорюють і спрощують процес реєстрації на рейс і здачі багажу.

У зв'язку з карантинними обмеженнями на вході в будівлі аеропортів було впроваджено температурний скринінг. Він показує температуру тіла людини, та визначає, чи можна їй далі пересуватись по будівлі, чи людині необхідно покинути її (рис. 8).



Рис. 8. Температурний скринінг
(Fig. 8. Temperature screening)

Зауважимо на деякі інші технологічні застосування, що впроваджено у найрозвиненіших аеропор-

тах світу. Зокрема, до десятки найбільш технологічних аеропортів світу належать такі: Чангі (Сінгапур), Ханеда (Токіо), Інчхон (Сеул), аеропорт ім. Штрауса (Мюнхен), Міжнародний аеропорт Гонконг, Хамад (Доха, Катар), Тюбу (Нагоя, Японія), аеропорт Цюріха, Хітроу (Лондон), аеропорт Франкфурта-на-Майні. Отже в аеропортах такого класу багаж можна зареєструвати в автоматичному режимі. Працює це просто: пасажир ставить валізу в спеціальний пристрій, що нагадує трубу, сканує посадковий талон і отримує багажну бирку, яку потрібно приклеїти до ручки. Система сама зважує і відправляє валізу за призначенням.

Крім того, роботи-помічники вміють сканувати посадкові талони і можуть не тільки складати маршрут до потрібного виходу на посадку, але й повідомляти погоду в місці призначення. Також роботи прибирають приміщення, переміщують багаж і працюють гідями (рис. 9).



Рис. 9. Робот-помічник в терміналі аеропорту
(Fig. 9. Assistant robot in the airport terminal)

Однією з обов'язкових процедур в аеропорті є скринінг безпеки, де відбувається перевірка ручної поклажі, а також перевірка людей у металодетекторі. Висока пропускна здатність пасажирів із низьким дотиком забезпечується використанням штучного інтелекту з елементами машинного навчання, зокрема, такої технології скринінгу, як Leidos (рис. 10).



Рис. 10. Скринінг безпеки
(Fig. 10. Security screening)

При проході через «розумні» термінали, а саме перед тим як проходити перевірку ручної поклажі та паспортного контролю, потрібно відскану-

вати посадковий талон. За допомогою технології FAST мандрівники можуть реєструватися в зручний для них час і проходити автоматично абсолютно всі додаткові процедури. Ця система складається з кіосків самостійної реєстрації, автоматів для імміграційного оформлення, здачі багажу, а також посадки на рейс. Таким чином, пасажери самі реєструються та здають багаж, самі проходять паспортний контроль, самі проходять на посадку і при цьому не контактують з персоналом аеропорту взагалі (рис. 11).



Рис. 11. Самостійне проходження паспортного контролю (Fig. 11. Self passport control)

Камери знімають обличчя пасажира під час реєстрації і при здачі багажу зв'язують його з фото у паспорті (рис. 12). Вихід на посадку також автоматизований, тобто пасажирів біля виходу на посадку зустрічає не співробітник аеропорту, а робот-помічник (див. рис. 9).



Рис. 12. Камера для знімку обличчя пасажира (Fig. 12. Camera for passenger face image)

Отже, можна виділити основні елементи інформаційних технологій, які функціонують в структурах аеропортів: Wi-Fi мережа, температурний скринінг, роботи-помічники, скринінг безпеки, FAST технологія для самостійної реєстрації та проходження всіх додаткових процедур за допомогою кіосків та автоматів. При цьому аеропорти по всьому світу інвестують в сферу обробки персональних даних пасажирів та впроваджують технології, які дозволяють прискорити обробку цих даних, знизити черги і зробити пасажирів більш поінформованими.

Результати проведеного аналізу сучасних інформаційних та геоінформаційних технологій, що використовуються для організації роботи аеропортів в умовах карантинного зонування, схематично відображено на рис. 13.

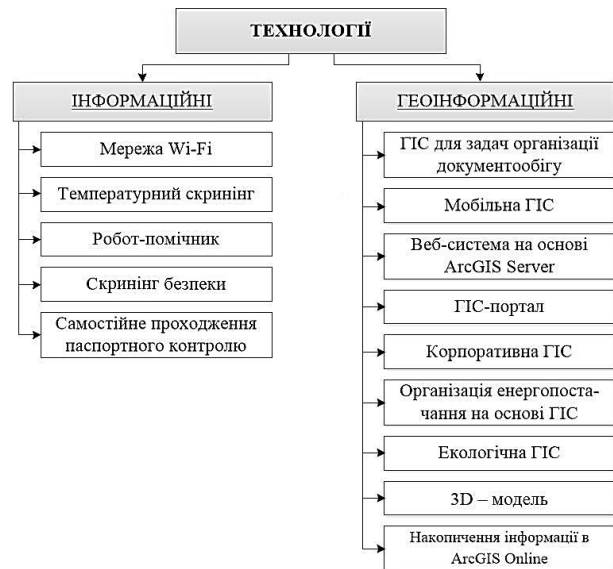


Рис. 13. Схема технологій, що використовуються в аеропортах (Fig. 13. Scheme of technologies used at airports)

Методика побудови маршрутів для організації пасажиропотоків в аеропортах в умовах карантинного зонування

Отже, розглянемо етапи дій, які складають методiku, що пропонується задля організації пасажиропотоків в аеропортах в умовах карантинного зонування.

Створення карт маршрутів пасажиропотоків на прикладі аеропорту міста Харкова. Структурна схема побудови маршрутів у терміналі аеропорту представлена на рис. 14. У якості вхідних даних використано плани терміналів. Далі для побудови маршрутів було застосовано програмні продукти ArcGIS та ArcGIS Online. Результати збережено із використанням програмного засобу WebMap.

Міжнародний аеропорт міста Харкова був відкритий 6 грудня 1932 року. Розташований він у дванадцяти кілометрів на південь від центру міста. Висота над рівнем моря становить 155 м. На території аеропорту розташовано три терміналі: два пасажирських та один вантажний. Має одну злітно-посадкову смугу. Динаміку зростання пасажиропотоку в аеропорту міста Харкова представлено на рис. 15.

В процесі досліджень було розглянуто план території терміналу А харківського аеропорту (рис. 16), а також його актуальні фотоплани (рис. 17).

Для створення картографічної моделі в програмному продукті ArcMap обирається інструмент «Add Data...» та завантажується карта світу. Далі для того, щоб векторизувати зображення терміналу аеропорту, створюється полігональний шейп-файл (рис. 18).

Наступним кроком виконується векторизація аерокосмічного зображення терміналу аеропорту (рис. 19).

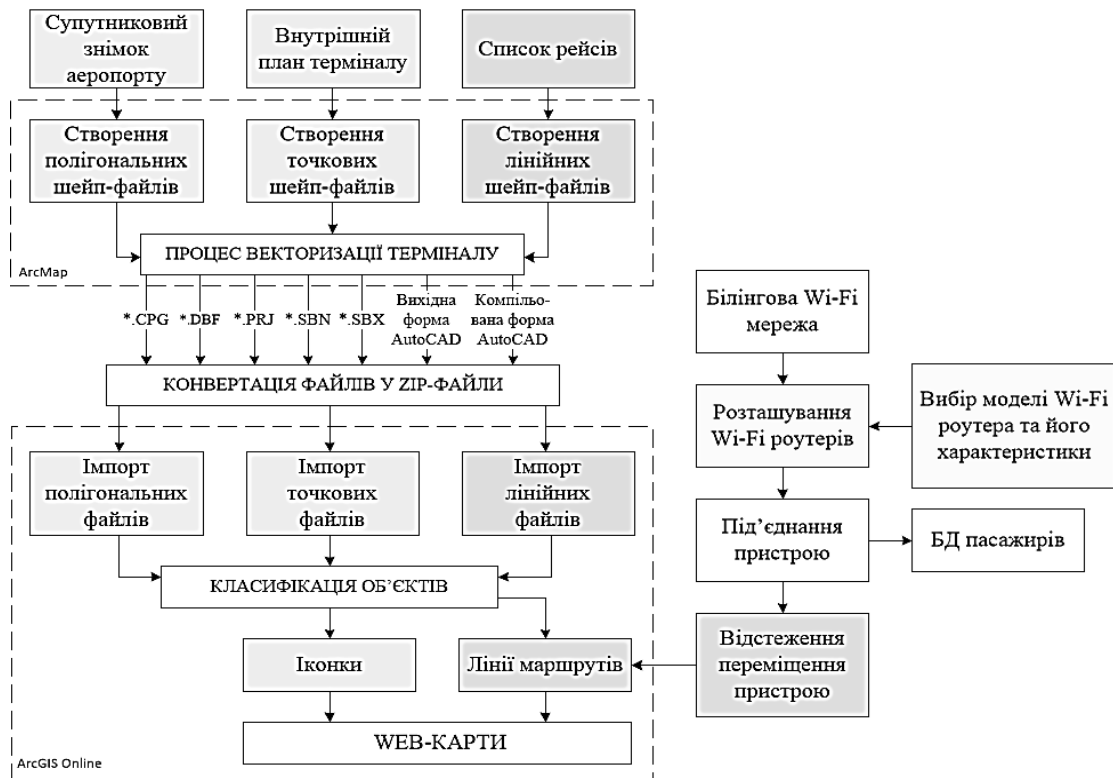


Рис. 14. Структурна схема побудови маршрутів в терміналі аеропорту (Fig. 14. Block diagram of route construction in the airport terminal)

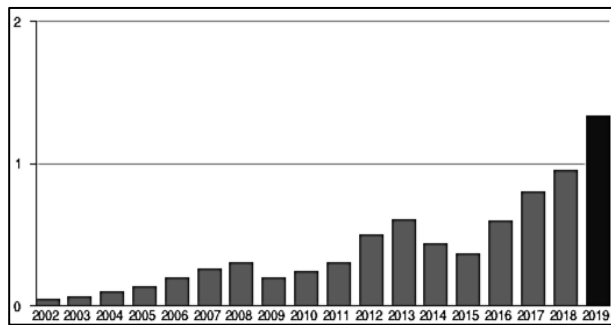


Рис. 15. Пасажиропотік аеропорту міста Харкова, млн. осіб за рік (Fig. 15. Passenger traffic at Kharkiv airport, million people per year)



Рис. 17. Термінал А в аеропорту міста Харкова (Fig. 17. Terminal A at the airport of Kharkiv)

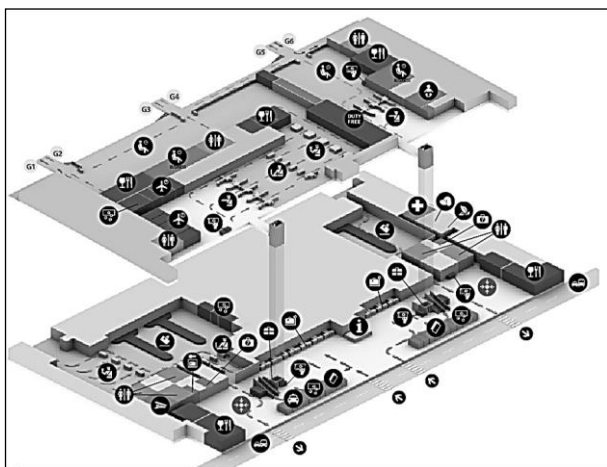


Рис. 16. План території терміналу А харківського аеропорту (Fig. 16. Territory plan of Terminal A of Kharkiv Airport)

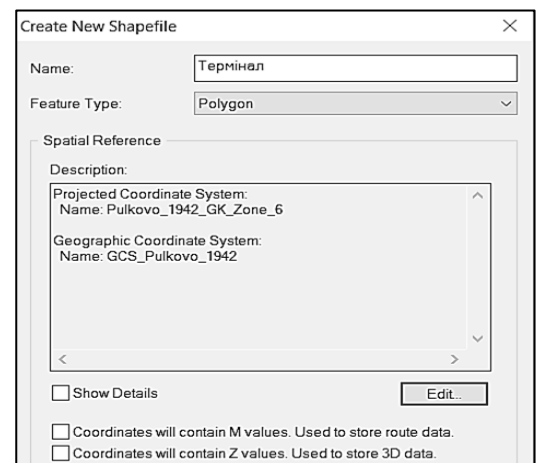


Рис. 18. Вікно створення полігонального шейп-файлу (Fig. 18. Window for creating a polygonal shapefile)

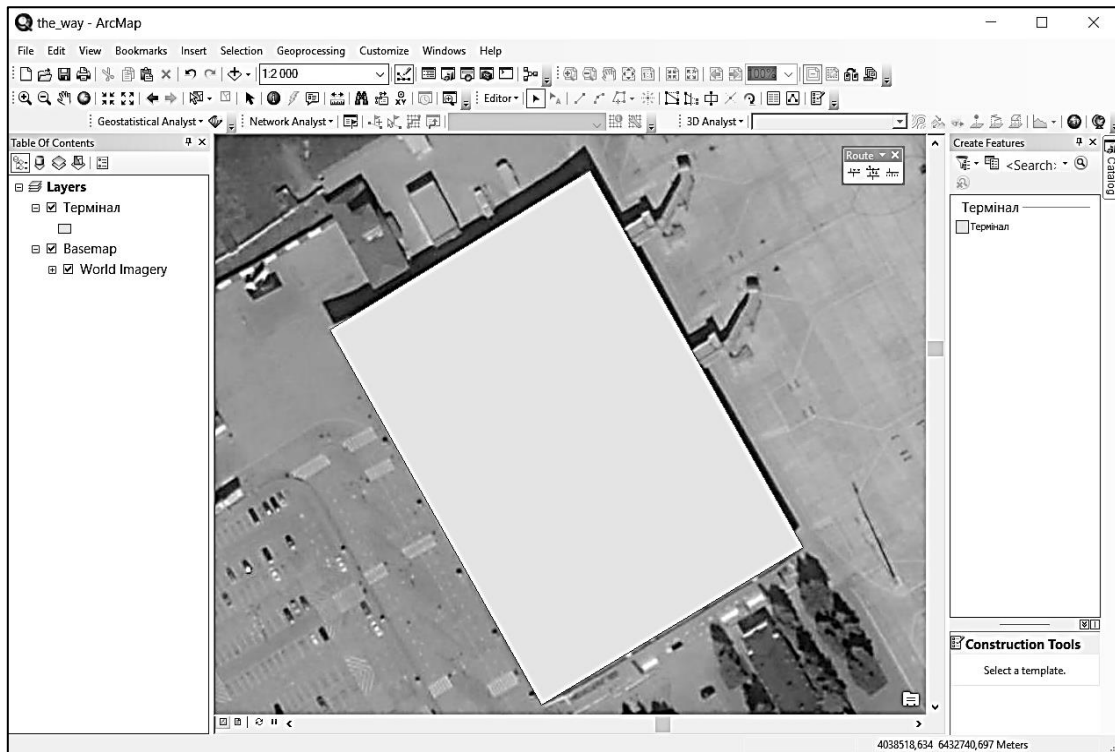


Рис. 19. Результат векторизації зображення терміналу аеропорту
(Fig. 19. The result of vectorization of the image of the airport terminal)

Далі створюється 19 додаткових точкових шейп-файлів (рис. 20). Для деяких точкових шарів необхідно створити нове поле в атрибутивній таблиці для додаткової інформації. Вікно створення нового поля представлено на рис. 21. Вигляд створеного поля після заповнення його додатковою інформацією представлено на рис. 22. Результат нанесення всіх точкових шейп-файлів – на рис. 23. Після нанесення всіх точкових шейп-файлів необхідно створити певну кількість лінійних шейп-файлів. Вікно створення лінійного шейп-шару представлено на рис. 24. Нанесення лінійних шарів представлено на рис. 25.

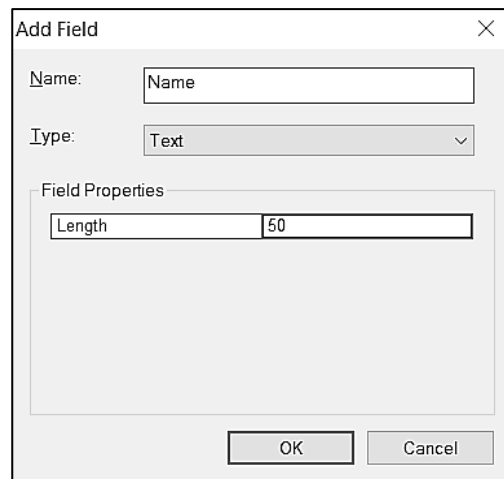


Рис. 21. Вікно створення поля в атрибутивній таблиці
(Fig. 21. Window for creating a field in the attribute table)

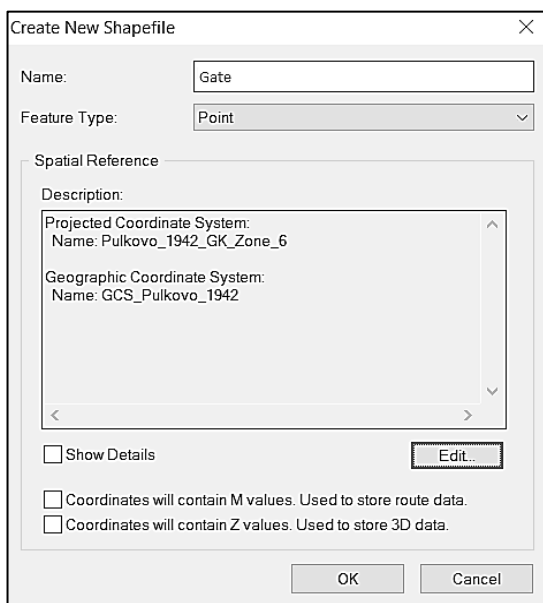


Рис. 20. Вікно створення точкового шейп-файлу
(Fig. 20. Window for creating a point shape file)

FID	Shape*	Id	Name
0	Point	1	Gate1
1	Point	2	Gate2
2	Point	3	Gate3
3	Point	4	Gate4
4	Point	5	Gate5
5	Point	6	Gate6

Рис. 22. Заповнене поле в атрибутивній таблиці
(Fig. 22. Filled field in the attribute table)



Рис. 23. Результат нанесення всіх точкових шейп-файлів (Fig. 23. The result of applying all point shapefiles)

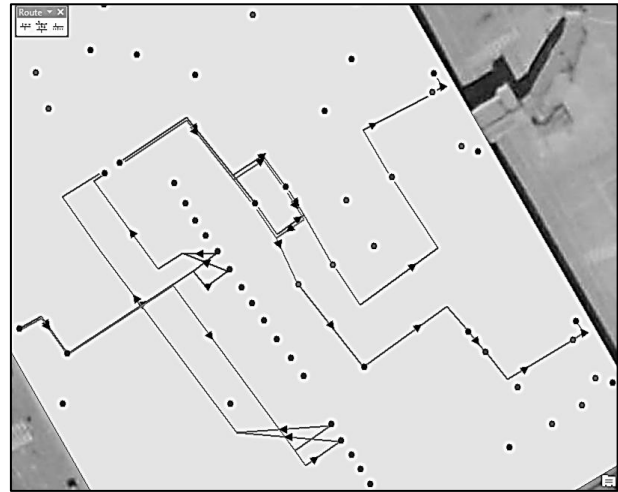


Рис. 25. Результат нанесення лінійних шарів (Fig. 25. The result of applying linear layers)

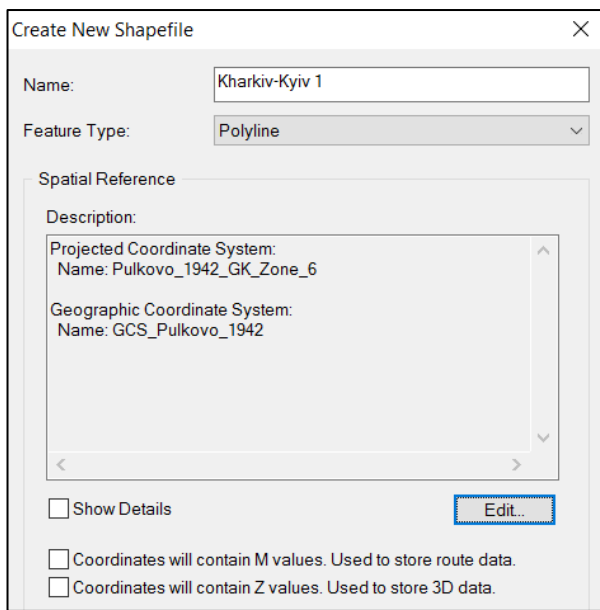


Рис. 24. Вікно створення лінійного шару (Fig. 24. Window for creating a linear layer)

Імпорт карти, синтезованої в середовищі ArcMAP, до середовища ArcGIS Online. Робота, проведена в середовищі ArcGIS Online, мала за мету створення карти, яка може використовуватись в корпоративному застосунку аеропорту. Для того, щоб імпортувати попередньо створені файли в ArcGIS Online, необхідно відкрити відповідну цільову папку та виділити всі файли з однаковою назвою, натиснути на праву клавішу миші, вибрати «Отправить» > «Сжатая ZIP-папка». Таку послідовність дій треба виконати для всіх шейп-шарів. Процес виконання цих процедур наведено на рис. 26. Далі слід відкрити інтернет-сторінку ArcGIS Online та обрати опцію «Карта» > «Создать новую карту». Для імпорту файлів натиснути «Добавить слой из файла», вибрати створений zip-файл та натиснути «Импортировать слой». Вікно додавання шару представлено на рис. 27. Отже, полігональний шар імпортовано до карти та проведено класифікацію шару для кращого сприйняття. Для цього було натиснуто «Показать содержимое карты» > «Изменить стиль» > «Параметры» > «Символ». Результат представлено на рис. 28.

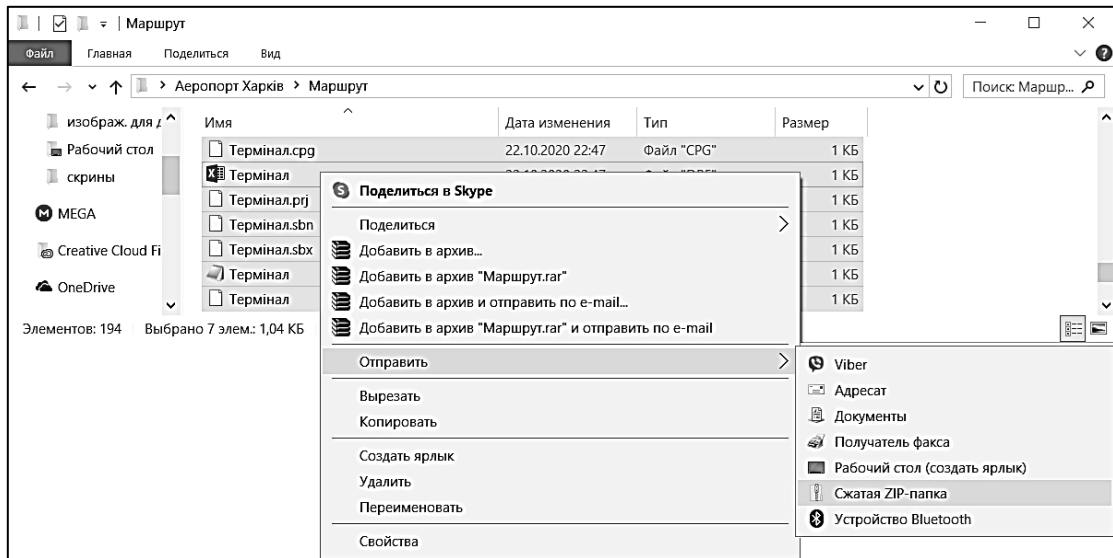


Рис. 26. Процес конвертації шейп-файлів (Fig. 26. The process of converting shapefiles)

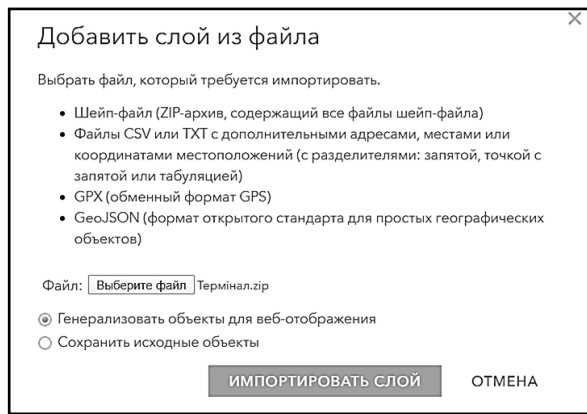


Рис. 27. Процес імпортування шару (Fig. 27. The process of importing a layer)



Рис. 30. Результат зміни символу точкового шару (Fig. 30. The result changes the character point layer)

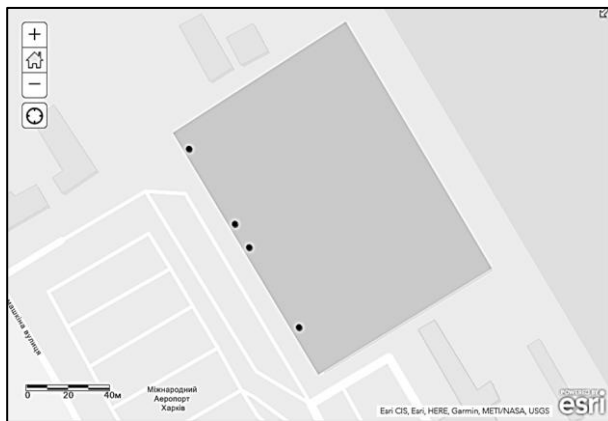


Рис. 28. Додані шейп-файли зі зміненими параметри (Fig. 28. Added shapefiles with changed settings)



Рис. 31. Карта внутрішнього оснащення терміналу, 1-й поверх (Fig. 31. Map of the internal equipment of the terminal, 1st floor)

В опціях параметрів слід натиснути «Использовать изображение» та додати певну обрану іконку. Вікно зміни символу представлено на рис. 29. Результат зміни символу представлено на рис. 30. Після цього необхідно додати інші точкові шари та змінити їх символи. Для шару «Стіжки реєстрації» було вибрано «Дополнительные опции» та із використанням заповненої таблиці атрибутів налаштовано підписи (рис. 31).

Наступним кроком є імпортування до ArcGIS Online створених лінійних zip-файлів. Ці файли представляють собою об'єкти напрямків маршрутів пасажирів від входу в термінал до виходу на посадку. Результат представлено на рис. 32.

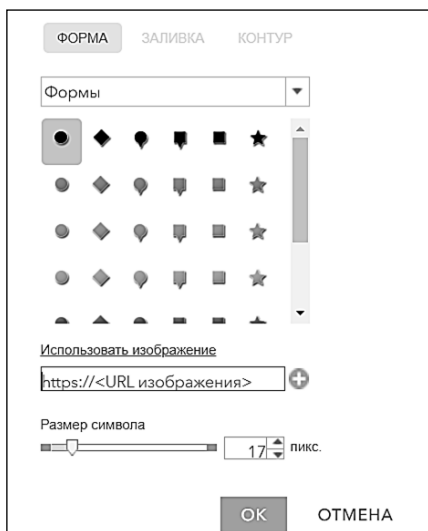


Рис. 29. Вікно зміни символу точкового шару (Fig. 29. Window for changing the symbol of the point layer)



Рис. 32. Результат доданого лінійного шейп-файлу (Fig. 32. The result of the added linear shapefile)

В параметрах було змінено колір та вибрано напрямки стрілки (рис. 33). Класифікацію лінійних файлів представлено на рис. 34. Далі слід створити ще одну карту для внутрішнього оснащення та прок-

ладання маршруту на другому поверсі терміналу. Отже додаються полігональний та всі необхідні точкові шари, змінюються символи для точкових шарів. Для шару «Gate» обираються «Дополнительные опции» та із використанням заповненої таблиці атрибутів налаштовуються підписи (рис. 35).

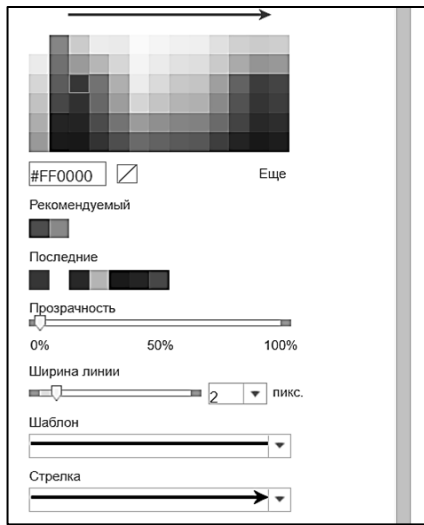


Рис. 33. Вікно для зміни кольору та виборі напрямку лінії (Fig. 33. The window to change color and choosing the direction of the line)

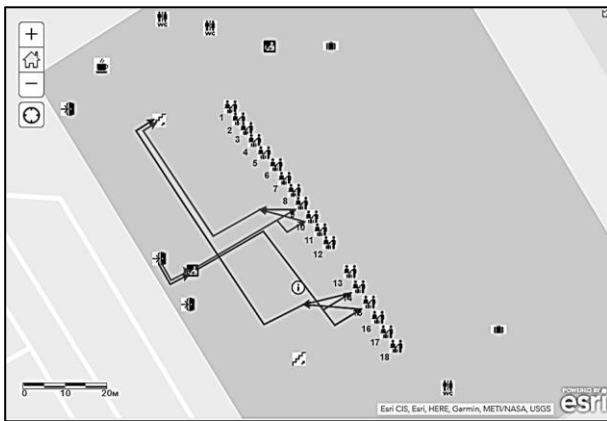


Рис. 34. Результат відредагованого першого лінійного шейп-файлу (Fig. 34. The result of the edited first linear shape file)



Рис. 35. Внутрішнє оснащення терміналу, 2-й поверх (Fig. 35. The internal equipment of the terminal, (2nd floor)

Після цього додається лінійний шар, змінюється колір та обирається напрямок ліній (рис. 36, 37).

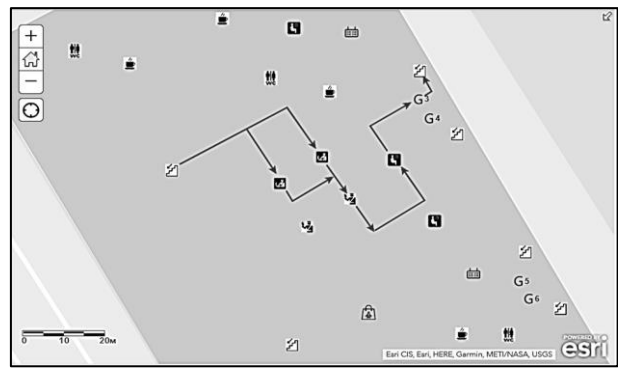


Рис. 36. Результат зміни кольору та напрямку ліній (Fig. 36. Result of changing the color and direction of lines)

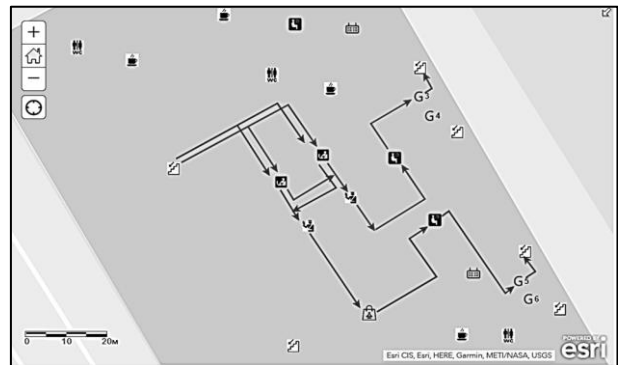


Рис. 37. Відредагований другий лінійний шейп-файл (Fig. 37. The result of the edited second linear shapefile)

Застосування білінгової Wi-Fi мережі

Для контролю та організації пасажиропотоків в реальному режимі часу необхідно, щоб територія аеропорту була обладнана білінговою мережею. Завдяки білінговій мережі Wi-Fi можна відслідковувати переміщення людей всередині приміщення за допомогою вбудованого Wi-Fi модулю на їх мобільних пристроях та спеціального корпоративного застосунку. Пристрій підключатиметься до одного з роутерів, які розташовані по всій території терміналу. Отже, коли людина заходить в будівлю терміналу, за допомогою мобільного пристрою вона під'єднується до Wi-Fi, на роутер приходить сигнал про спробу підключитись. Тоді, коли власний мобільний пристрій підключився до одного з роутерів, то в залежності від пересування людини по терміналу власний пристрій буде автоматично підключатись до того роутера, в зону дії якого цей пристрій він потрапив. Структура білінгової Wi-Fi мережі представлена на рис. 38.

Принцип дії такої мережі полягає в наступному.

1. Роутер постійно генерує сигнал Wi-Fi та реєструє спробу нового пристрою приєднатися до мережі Wi-Fi в режимі реального часу. Створюється список пристроїв, які знаходяться в радіусі дії цього Wi-Fi модуля. Потім роутер відправляє цей список на сервер в режимі реального часу. При цьому роутер підключається тільки до тих власних мобільних пристроїв, на яких заздалегідь було встановлено корпоративний застосунок аеропорту.

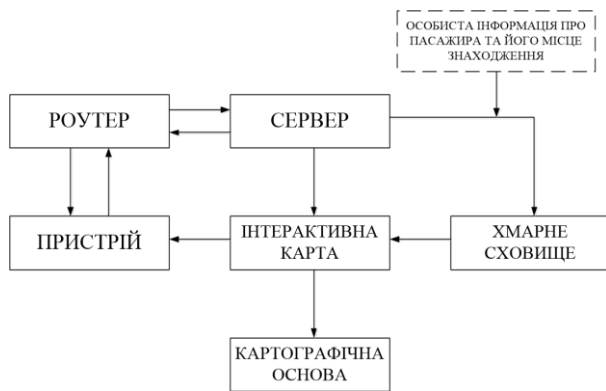


Рис. 38. Структура білінгової Wi-Fi мережі
(**Fig. 38.** The structure of the billing Wi-Fi network)

2. Сервер пов’язує всі роутери та зчитує з них дані в режимі реального часу, в тому числі й списки, які надходять з роутера.

3. Мобільний пристрій, за умови включеного модуля Wi-Fi та встановленого корпоративного застосунку аеропорту (Android / iOS), автоматично буде підключатися та авторизуватися до мережі модулів Wi-Fi аеропорту.

4. Інтерактивна карта служить для отримання даних з сервера та відображення місцезнаходження мобільного пристрою на території аеропорту в режимі реального часу.

5. Хмарне сховище — віддалений інтерактивний сервер, на якому зберігаються дані з інтерактивної карти.

6. Картографічна основа створена в середовищі ArcGIS Online.

Вибір роутера треба виконувати з урахуванням особливостей певного аеропорту, Наприклад, площа терміналу А міста Харкова сягає 20 000 м². Тому у якості роутера для даного терміналу має сенс обрати, наприклад, TP-Link Deco M5 (3-пак) 717MHz (рис. 39).



Рис. 39. Інтернет-роутер TP-Link Deco M5
(**Fig. 39.** Internet router TP-Link Deco M5)

Пристрої будуть автоматично перемикатися між різними модулями Deco на високій швидкості, куди б не пішли пасажирів аеропорту, забезпечуючи безперервне з’єднання без "мертвих зон".

Комплект Deco M5 з двома пристроями забезпечує покриття до 350 кв. м., а комплект Deco M5 з трьома пристроями — до 510 кв. м. Якщо цього недостатньо, треба просто додати в мережу більше модулів Deco для збільшення покриття.

- Основні технічні характеристики:
- Deco M5 забезпечує стабільне з’єднання зі швидкістю до 1267 Мбіт / с;
 - комплект Deco M5 здатний підтримувати роботу навіть найбільш завантаженої мережі, забезпечуючи одночасне з’єднання для більш, ніж 100 пристроїв;
 - максимальна швидкість передачі даних Wi-Fi – 400 Мбіт/с на 2,4 ГГц та 867 Мбіт/с на 5 ГГц;
 - максимальна швидкість передачі даних LAN – 1000 Мбіт/с.

На рис. 40 схематично зображено розташування роутерів Wi-Fi та показано зони їх дії. Всі роутери розташовано на стінах та стелях. Схема розташування роутерів підходить як для першого поверху, так і для другого.



Рис. 40. Картографічна схема розташування роутерів Wi-Fi та зон їх дії в аеропорті міста Харкова
(**Fig. 40.** Cartographic layout of Wi-Fi routers and their areas of operation at the airport of Kharkiv)

Отже, завдяки підключенню персональних мобільних пристроїв до роутерів Wi-Fi, має відбуватись відстеження пересування пасажирів у будівлі аеропорту. Ця інформація може бути використана пасажиром, працівниками аеропортів та авіакомпаній. Приклад картографічної моделі у корпоративному застосунку аеропорту, з використанням якої пасажир може відстежувати своє місцезнаходження, представлено на рис. 41.

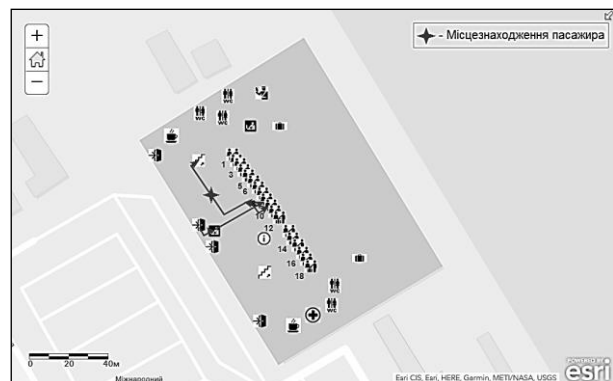


Рис. 41. Картографічна модель з можливістю для пасажирів відстежувати своє місцезнаходження
(**Fig. 41.** Cartographic model with the ability for the passenger to track their location)

Приклад картографічної моделі у корпоративному застосунку аеропорту, з використанням якої працівники аеропорту можуть відстежувати місцерозташування пасажирів певних рейсів – на рис. 42.

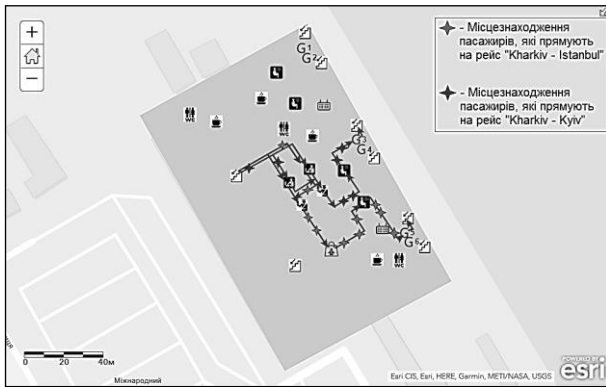


Рис. 42. Картографічна модель з можливістю для працівників аеропорту відстежувати місцерозташування пасажирів (Fig. 42. Cartographic model with the ability for airport staff to track the location of passengers)

Така технологія особливо актуальна для аеропортів з декількома терміналами, в яких час переходу

має дуже велике значення для транзитних пасажирів. Додаток не тільки прокладатиме маршрут до обраної точки, а ще буде інформувати про статус рейсу, заду багажу, часу очікування в черзі на паспортний контроль тощо.

Завдяки створеній білінгвовій Wi-Fi мережі в терміналі можна відслідковувати переміщення пасажирів за допомогою мобільних пристроїв: телефону, планшету та ноутбука. Після того, як пасажир зайшов у будівлю терміналу та під'єднав свій пристрій до Wi-Fi мережі, а також зайшов до корпоративного додатку аеропорту, його особисті дані, дані про його переліт та дані про проходження всіх необхідних пунктів поступово заносяться до баз даних (БД).

Структура реляційної БД, запропонованої для організації та управління пасажиропотоками в аеропортах представлена на рис. 43.

Запропонована структура БД відмінна, перш за все, наявністю блока "Місцерозташування" в сегменті "ПАСАЖИРИ" та забезпечуваного ним блока "Відстеження місцезнаходження пасажирів" в сегменті "АЕРОПОРТИ". Саме це й сприяє покращенню організації пасажиропотоків в аеропортах в умовах карантинних обмежень.

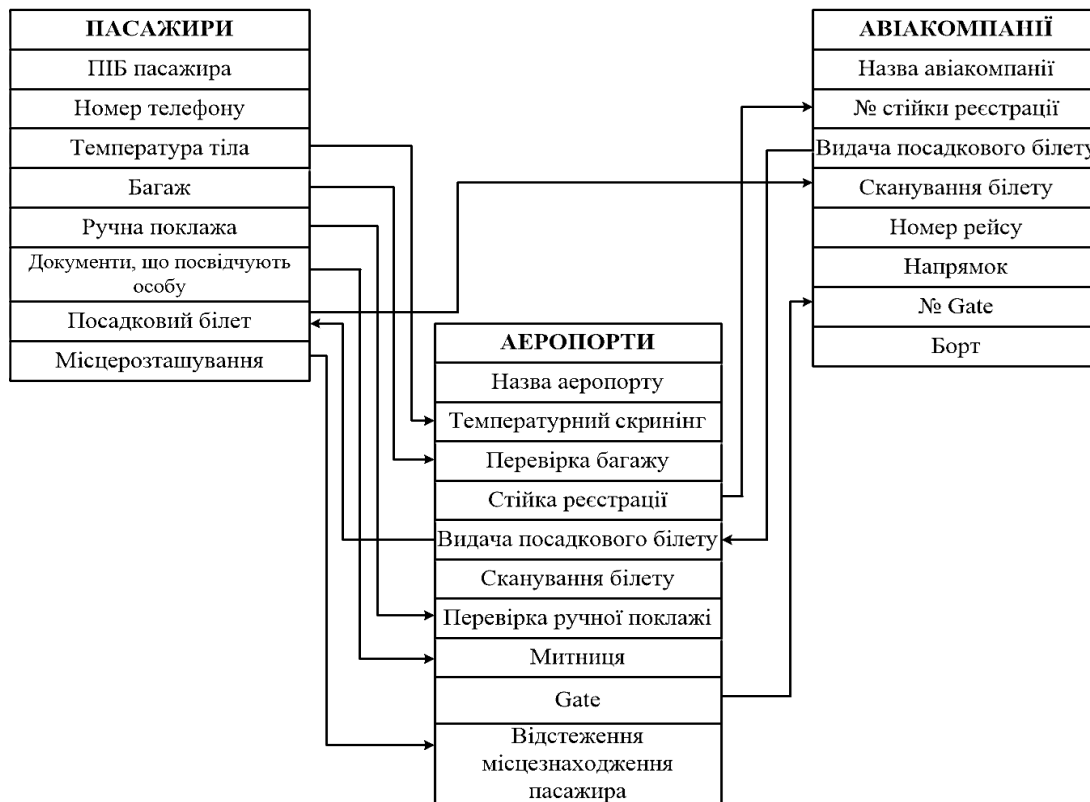


Рис. 43. Структура БД для організації та управління пасажиропотоками в аеропортах (Fig. 43. Database structure for the organization and management of passenger flows at airports)

Створення WEB-сервісу для картографічних моделей терміналів аеропортів на прикладі аеропорту ім. Шарля де Голля

Редактори програмних кодів призначені для забезпечення ефективного і продуктивного процесу їх розроблення. Сучасні редактори надають широкий асортимент інструментів, що зменшують кількість

кроків, необхідних для виконання певних завдань, тому виконання роботи стає швидшим.

Щоб обрати найдоцільніший редактор коду для реалізації поставленої задачі, були розглянуті та порівняні можливості декількох сучасних редакторів.

Notepad++ — текстовий редактор, який доступний тільки на платформі Windows. Він призначений для програмістів і всіх тих, кого не влаштовує скром-

на функціональність стандартного Notepad, що входить до складу Windows.

TextMate вважається «недопрацьованим редактором» для Mac OS, який поєднує графічний користувацький інтерфейс і системну структуру UNIX. За замовчуванням цей редактор має власний потужний функціонал, включаючи пошук і заміну, вибір колонок, що згортаються, блоки коду, доповнення коду, базове підсвічування синтаксису для десятків мов програмування і багато іншого.

Незважаючи на те, що TextMate має відкритий вихідний код, це комерційний продукт, що випускається під ліцензією BSD.

Sublime Text — безкоштовний для некомерційного використання текстовий редактор. Він не тільки легкий і дуже швидкий в роботі, але також і розширюваний. Ще цей редактор підтримує безліч мов програмування, серед яких Erlang, HTML, CSS, C ++, Java, JavaScript, Perl, PHP, Python, Lua, Markdown,

MATLAB, SQL, TCL тощо. Із використанням Sublime Text можна контролювати будь-які дії, пов'язані з написанням коду, завдяки розвиненим функціям, таким як: множинна правка, установка закладок, перевірка орфографії, мултивиділення тощо. В редактор вмонтовано інструмент пошуку й заміни регулярних виразів. Наявність мультипанелі дозволяє працювати відразу з декількома текстовими файлами в одному вікні. До того ж кросплатформеність Sublime Text забезпечує перехід від одної операційної осі до іншої, чого не скажеш, наприклад, про Notepad ++.

Отже, пропонується структурна схема сайту картографічних моделей терміналів аеропорту ім. Шарля де Голля (рис 44). На основі розробленого програмного коду було створено геопортал на базі Інтернет-ресурсу «Google Chrome». Сторінки створеного сайту представлено на рис. 45 – 51.

Візуалізацію роботи WEB-сервісу картографічних моделей терміналу представлено на рис. 52 – 55.

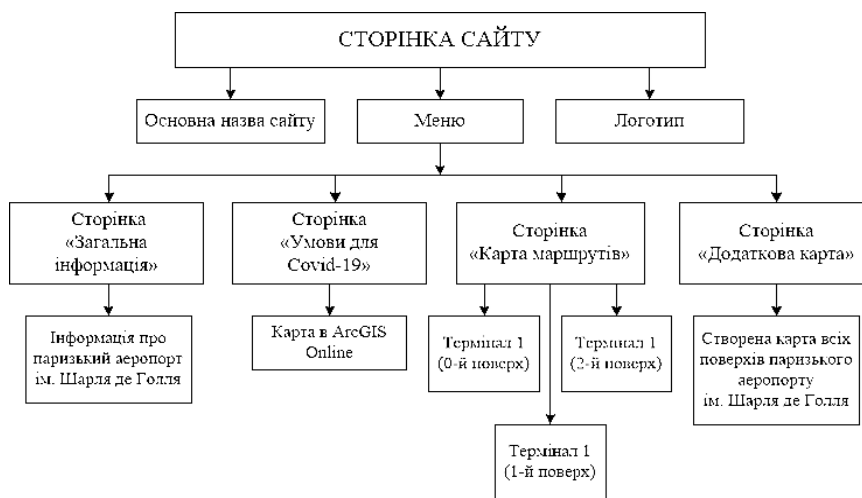


Рис. 44. Структурна схема сайту картографічних моделей терміналів аеропорту ім. Шарля де Голля (Fig. 44. Block diagram of the site of cartographic models of terminals of the Charles de Gaulle airport)



Рис. 45. Сторінка «Загальна інформація» (Fig. 45. Page “General Information”)

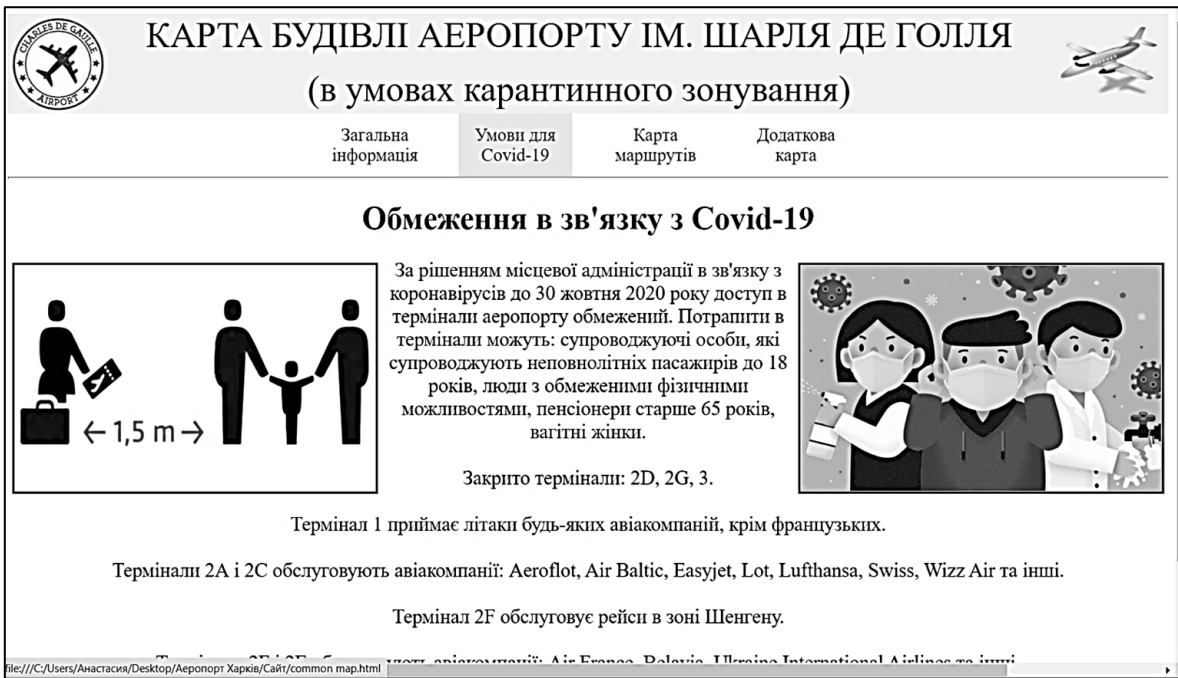


Рис. 46. Сторінка «Загальна інформація (карантинні обмеження)» (Fig. 46. Page "General information (quarantine restrictions)")



Рис. 47. Сторінка «Карта маршрутів» та її спадаюче меню (Fig. 47. Route Map page and its drop-down menu)



Рис. 48. Сторінка «Карта маршрутів (Термінал 1, 0-й поверх)» (Fig. 48. Page "Route map (Terminal 1, 0th floor)")



Рис. 49. Сторінка «Карта маршрутів (Термінал 1, 1-й поверх)» (Fig. 49. Page "Route map (Terminal 1, 1st floor)")



Рис. 50. Сторінка «Карта маршрутів», «Термінал 1 (2-й поверх)» (Fig. 50. Page "Route Map", "Terminal 1 (2nd floor)")



Рис. 51. Сторінка «Додаткова карта» (Fig. 51. "Additional map" page)

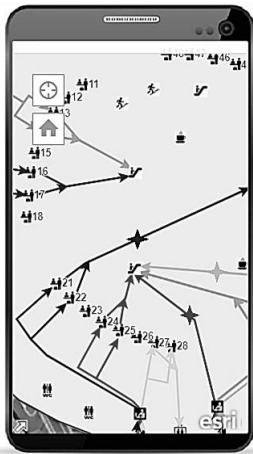


Рис. 51. Візуалізація на смартфоні
(Fig. 51. Visualization on a smartphone)



Рис. 52. Візуалізація на ноутбуці
(Fig. 52. Visualization on a laptop)



Рис. 53. Візуалізація на стаціонарному комп'ютері
(Fig. 53. Visualization on a desktop computer)

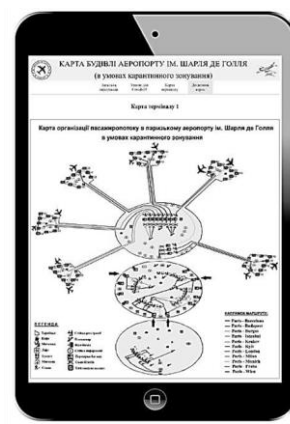


Рис. 54. Візуалізація на планшеті
(Fig. 54. Visualization on a tablet)

Розроблені картографічні моделі для організації пасажиропотоків в аеропортах в умовах карантинного зонування є зручними та ергономічними щодо використання робітниками аеропортів та авіакомпаній. Тим більш, пасажирів також можуть оперативно отримувати часткову інформацію, достатню для організації свого руху в терміналі аеропорту згідно з карантинними обмеженнями.

Висновки

На підставі проведеного аналізу діяльності аеропортів світу за останні п'ять років виявлено стійку тенденцію до збільшення кількості авіарейсів, а отже — збільшення пасажиропотоків в аеропортах. Також проаналізовано прогнози щодо тенденцій розвитку повітряного руху в Європі в найближчі п'ять років, які свідчать про напрямок зростання авіаперевезень.

Проведено аналіз впливу карантинних обмежень у зв'язку з розповсюдженням COVID-19, який показав, що не дивлячись на значне зниження пасажиропотоків в аеропортах світу в зв'язку з карантинними обмеженнями, буде спостерігатися значне зростання пасажиропотоків після карантинного послаблення.

На підставі зазначеного, зроблено висновок, що нагальним є покращення організації пасажиропотоків в аеропортах в умовах карантинних обмежень за

рахунок використання WEB-сервісів на основі картографічних моделей будівель аеропортів.

Разом з тим, проведено аналіз доцільності застосування ГІС-технологій в аеропортах, а також огляд сучасних інформаційних технологій, що у теперішній час використовуються для організації роботи аеропортів в умовах карантинного зонування.

Розроблено методику побудови маршрутів для організації пасажиропотоків в аеропортах в умовах карантинного зонування. Методика передбачає створення карт маршрутів пасажиропотоків в аеропортах з використанням найсучасніших картографічних програмних продуктів ArcGIS та ArcGIS Online, містить рекомендації щодо застосування білінгвової Wi-Fi мережі для відстеження пересування пасажирів у будівлях аеропортів, і, врешті, передбачає створення WEB-сервісів для картографічних моделей терміналів аеропортів.

Розроблені із застосуванням запропонованої методики WEB-сервіси для організації пасажиропотоків в аеропортах в умовах карантинного зонування є зручними та ергономічними щодо використання робітниками аеропортів та авіакомпаній. Тим більш, пасажирів також можуть оперативно отримувати часткову інформацію, достатню для організації свого руху в терміналі аеропорту згідно з карантинними обмеженнями.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Андрєєв С. М., Жилін В. А. Застосування технологій геоінформаційних систем для побудови картографічних моделей залізничних сполучень. *Системи управління, навігації та зв'язку: збірник наукових праць*. Полтава: Національний ун-т "Полтавська політехніка ім. Ю. Кондратюка", 2021. Вип. 1(63). С. 4-16. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.1.004>.
2. Андрєєв С. М., Жилін В. А., Угарова А. С. Транспортно-навігаційна система моделювання руху маршрутного транспорту. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: ПНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2017. Вип. 6(46). С. 3-7.
3. Андрєєв С. М., Жилін В. А. Геоінформаційна система підтримки прийняття рішень на базі сховища просторових даних геопорталу. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Т. 4, № 2. С. 60-79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.11>.
4. Андрєєв С. М., Жилін В. А. Застосування даних аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів для побудови 3D-моделей місцевості. *Системи управління, навігації та зв'язку*: Полтава: ПНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2019. Вип. 1(53). С. 3-16.
5. Рейтинг самых крупных аэропортов мира по уровню пассажиропотока. URL: <https://nonews.co/directory/lists/other/passenger-airports>
6. Авіаперевезення можуть відновитися до рівнів 2019 року не раніше 2029 року. URL: <https://www.epravda.com.ua/news/2020/11/4/666928/>
7. Цифровой двойник на базе ГИС помогает оптимизировать рабочие процессы аэропорта. URL: <https://blogs.esri-cis.ru/2020/03/17/digital-twin-gis-airport/>
8. Инновации в аэропортах мира — всё для комфорта пассажиров. URL: <https://aviation21.ru/innovacii-v-aeroportax-mira-vsyo-dlya-komforta-passazhirov/>
9. What is a Smart Airport? URL: <https://airporturbanism.com/articles/what-is-a-smart-airport>
10. What is a Resilient Airport? URL: <https://airporturbanism.com/articles/what-is-a-resilient-airport>
11. Міжнародний аеропорт «Харків». URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki>
12. Аэропорт Шарль-де-Голль [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://frenchparis.ru/paris-charles-de-gaulle/>
13. Выбор лучшего редактора кода для веб-разработки. URL: <https://techrocks.ru/2018/08/03/choosing-the-best-code-editor/>
14. Sublime Text. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Sublime_Text
15. Лурье И. К., Самсонов Т. Е. Структура и содержание базы пространственных данных для мультимасштабного картографирования. *Геодезия и картография*. 2010, №11. С. 17-23.
16. Самсонов Т. Е. Мультимасштабные базы геоданных для электронных карт. *Пространственные данные*, №4. 2009. С. 46-51.
17. Востокова А. В., Кошель С. М., Ушакова Л. А. Оформление карт. *Компьютерный дизайн*. М.: Аспект Пресс, 2002. 288 с.
18. Майоров Н. Н., Фетисов В. А., Гардюк А. Н. Технологии и методы моделирования пассажирских перевозок на воздушном транспорте. СПб.: ГУАП, 2014. 215 с.

REFERENCES

1. Andrieiev, S.M. and Zhilin, V.A. (2021), "Application of geoinformation systems technologies for construction of cartographic models of railway connections", *Control, navigation and communication systems: collection of scientific works*, No. 1(63), Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, Poltava, pp. 4-16. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.1.004>.
2. Andrieiev, S.M., Zhilin, V.A. and Ugarova, A.S. (2017), "Transport and navigation system for modeling the movement of route transport", *Control, navigation and communication systems*, No. 6(46), Poltava NTU Yuri Kondratyuk, Poltava, pp. 3-7.
3. Andrieiev, S.M. and Zhilin, V.A. (2020), "Geoinformation system of decision support based on the geoportall spatial data storage", *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 2, pp. 60-79, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.11>.
4. Andreev, S. and Zhilin, V. (2019), "Application of aerophotic data with unmanned aircraft for developing 3D models of terrain", *Control, navigation and communication systems*, No. 1(53), Poltava NTU Yuri Kondratyuk, Poltava, pp. 3-16.
5. *Rating of the largest airports in the world in terms of passenger traffic*, available at: <https://nonews.co/directory/lists/other/passenger-airports>
6. *Air transportation may resume to the levels of 2019 not earlier than 2029*, available at: <https://www.epravda.com.ua/news/2020/11/4/666928/>
7. GIS-based digital twin helps streamline airport workflows, available at: <https://blogs.esri-cis.ru/2020/03/17/digital-twin-gis-airport/>
8. Innovations in the world's airports - everything for the comfort of passengers, available at: <https://aviation21.ru/innovacii-v-aeroportax-mira-vsyo-dlya-komforta-passazhirov/>
9. What is a Smart Airport? [Electronic resource], available at: <https://airporturbanism.com/articles/what-is-a-smart-airport>
10. What is a Resilient Airport? available at: <https://airporturbanism.com/articles/what-is-a-resilient-airport>
11. Kharkiv International Airport, available at: <https://uk.wikipedia.org/wiki>
12. Charles de Gaulle airport, available at: <https://frenchparis.ru/paris-charles-de-gaulle/>
13. Choosing the best code editor for a web developer, available at: <https://techrocks.ru/2018/08/03/choosing-the-best-code-editor/>
14. Sublime Text, available at: https://uk.wikipedia.org/wiki/Sublime_Text
15. Lurie, I. K. and Samsonov, T. E. (2010), "The structure and content of the spatial database for multiscale mapping", *Geodesy and Cartography*, No. 11, pp. 17-23.
16. Samsonov, T. E. (2009), "Multiscale geodatabase for electronic maps", *Spatial data*, No. 4, pp. 46-51.
17. Vostokova, A. V., Koshel, S. M. and Ushakova, L. A. (2002), *Card design. Computer design*, Aspect Press, Moscow, 288 p.
18. Mayorov, N. N., Fetisov, V. A. and Gardyuk, A. N. (2014), *Technologies and methods of modeling passenger traffic in air transport*, GUAP, St. Petersburg, 215 p.

Received (Надійшла) 24.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.04.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Андрєєв Сергій Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Національний аерокосмічний університет «ХАІ», Харків, Україна;

Sergey Andrieiev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Geoinformation Technologies and Space Monitoring of the Earth Department, National Aerospace University "KhAI", Kharkiv, Ukraine; e-mail: AndreevSM@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4256-2637>.

Жилин Володимир Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Національний аерокосмічний університет «ХАІ», Харків, Україна;

Volodymyr Zhilin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Geoinformation Technologies and Space Monitoring of the Earth Department, National Aerospace University "KhAI", Kharkiv, Ukraine; e-mail: v.zhilin@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7342-3456>.

Сабадош Анастасія Любомирівна – інженер, Національний центр управління та випробувань космічних засобів, Київ;

Anastasiia Sabadosh – engineer, National space facilities control and test center, Kyiv, Ukraine; e-mail: s.anastasiia24@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2640-5666>.

Применение геоинформационных технологий для организации пассажиропотоков в аэропортах в условиях карантинного зонирования

С. М. Андреев, В. А. Жилин, А. Л. Сабадош

Аннотация. Предметом исследования является разработка методики построения WEB-сервисов на основе картографических моделей аэропортов для организации пассажиропотоков в условиях карантинного зонирования. **Объектом исследования** является процесс организации пассажиропотоков в аэропортах. **Целью работы** является улучшение организации пассажиропотоков в аэропортах в условиях карантина за счет использования WEB-сервисов на основе картографических моделей зданий аэропортов. **Выводы.** На основании проведенного анализа деятельности аэропортов мира за последние пять лет выявлено устойчивую тенденцию к увеличению количества авиарейсов, а, следовательно — к увеличению пассажиропотоков в аэропортах. Также проанализированы прогнозы относительно тенденций развития воздушного движения в Европе в ближайшие пять лет, которые свидетельствуют о направлении к росту авиоперевозок. Проведен анализ влияния карантинных ограничений в связи с распространением COVID-19, который показал, что, несмотря на значительное снижение пассажиропотоков в аэропортах мира в связи с карантинными ограничениями, будет наблюдаться значительный рост пассажиропотоков после карантинного послабления. На основании указанного, сделан вывод, что актуальным является улучшение организации пассажиропотоков в аэропортах в условиях карантина за счет использования WEB-сервисов на основе картографических моделей зданий аэропортов. Вместе с тем, проведен анализ целесообразности применения ГИС-технологий в аэропортах, а также обзор современных информационных технологий, которые в настоящее время используются для организации работы аэропортов в условиях карантинного зонирования. Разработана методика построения маршрутов для организации пассажиропотоков в аэропортах в условиях карантинного зонирования. Методика предусматривает создание карт маршрутов пассажиропотоков в аэропортах с использованием самых современных картографических программных продуктов ArcGIS и ArcGIS Online, содержит рекомендации по применению биллинговой Wi-Fi сети для отслеживания передвижения пассажиров в зданиях аэропортов, и, наконец, предусматривает создание WEB-сервисов для картографических моделей терминалов аэропортов. Разработанные с применением предложенной методики WEB-сервисы для организации пассажиропотоков в аэропортах в условиях карантинного зонирования являются удобными и эргономичными касательно использования рабочими аэропортов и авиакомпаний. Тем более, пассажиры также могут оперативно получать частичную информацию, достаточную для организации своего движения в терминале аэропорта согласно с карантинными ограничениями.

Ключевые слова: геоинформационные системы; картографические модели аэропортов; WEB-сервисы; карантинное зонирование; организация пассажиропотоков.

Application of geoinformation technologies for organizing passenger traffic at airports in conditions of quarantine zoning

Sergey Andrieiev, Volodymyr Zhilin, Anastasiia Sabadosh

Abstract. The subject of research is the development of a method for constructing WEB-services based on cartographic models of airports for organizing passenger flows in conditions of quarantine zoning. **The object of the research** is the process of managing passenger flows at airports. **The objective of the work** is to improve the organization of passenger traffic at airports under quarantine conditions with the use of WEB-services based on cartographic models of airport buildings. **Conclusions.** Using the analysis results of the world's airports activities over the past five years, a steady trend has been revealed towards an increase of the number of flights, and, consequently, growth of the passenger traffic at airports. Also forecasts of air traffic development trends in Europe in the next five years are analyzed, which indicate the direction towards the growth of air traffic. An analysis of the quarantine restrictions impact in connection with the spread of COVID-19 was carried out, which showed that, despite a significant decrease in passenger traffic at airports in the world due to quarantine restrictions, there will be a significant increase in passenger traffic after quarantine relief. Based on the above, it was concluded that it is urgent to improve the organization of passenger traffic at airports under quarantine conditions through the use of WEB-services based on cartographic models of airport buildings. At the same time, the feasibility of using GIS technologies at airports analysis was made, as well as a review of modern information technologies that are currently used to organize the operation of airports in conditions of quarantine zoning. A method for constructing routes for organizing passenger flows at airports in conditions of quarantine zoning has been developed. The methodology envisages for the creation of airports passenger traffic maps using the most modern cartographic software products ArcGIS and ArcGIS Online, it contains recommendations for using a billing Wi-Fi network to track the movement of passengers in airport buildings, and, finally, envisages for the creation of WEB services for cartographic models of airports terminals. Developed with the use of proposed methodology, WEB-services for organizing passenger flows at airports in conditions of quarantine zoning, are convenient and ergonomic in terms of usage by workers of airports and airlines. Moreover, passengers can also quickly receive partial information sufficient to organize their movement in the airport terminal in accordance with quarantine restrictions.

Keywords: geographic information systems; cartographic models of airports; WEB-services; quarantine zoning; passenger traffic management.

Volodymyr Andrushevich, Ivan Obod

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

ASSESSMENT OF THE QUALITY OF INFORMATION SUPPORT BY AIR RADAR SURVEILLANCE SYSTEMS

Abstract. The paper pays attention to the consideration of the structure of user's information support of the airspace control system at the stage of primary information processing by the joined radar system. This system includes a primary and identification surveillance system, which allows considering the overall structure as a single synchronous network of surveillance information systems. Such a structure can be characterized by an overall integrated quality indicator of the information support of the airspace control system. Such a quality indicator can be the probability of information support, which is the product of the probabilities of correct detection of an air object by the primary radar and identification system on the basis of "friend-foe" and the probability of comparing the coordinate information of primary radar systems and identification systems. This approach allows changing the model of combining information for primary radar systems and identification systems so as to take into account the estimated coordinates of the air object by both information systems due to the weight combination of coordinates of air objects. The calculation of the coordinates of air objects according to the information of the primary radar systems and identification systems allows improving the quality of information support for decision makers in the air traffic control system.

Keywords: air traffic control system; primary and secondary radar surveillance systems; quality assessment of information support; integrated indicator of information processing quality Neumann-Pearson criterion.

Introduction

Problem statement and analysis of the literature. Primary [1, 2] and secondary (identification) [3, 4] radar surveillance systems (SS) are the basis for information support of the airspace control system. The first determines the spatial coordinates of the air object, and the second determines the state affiliation of the detected air object. These two radar systems form the basis of information support for decision-makers in the airspace control system. For this purpose, according to the information of the considered radar surveillance systems, the logbook of the air object is drawn up, which contains the coordinates of the detected air object and the sign "Own - alien".

Therefore, the form of air objects is formed by comparing the spatial coordinates calculated by the primary and secondary radar systems. The combination of information is carried out automatically and based on the comparison of the coordinates of air objects, calculated from the information of the primary radar systems and identification systems. Coordinates in the considered information systems are calculated on the basis of processing of a pack of the received signals by each radar system considered. When the coordinates of air objects, calculated according to the primary radar systems and identification systems, taking into account the resolutions of these surveillance systems, the affiliation "Own" is entered in the logbook of the air object. If there are no response signals on the identification system, the aerial object the affiliation "Alien" is entered to the logbook. At the same time, only the coordinates of the air object calculated according to the data of the primary radar system are entered to the logbook of the air object, regardless of what will be the sign of the air objects "Own or alien." This reduces the quality of these aerial objects with the "Own" sign, which is issued to decision makers. Indeed, the coordinates of air objects calculated from identification systems are more accurate and would

improve the quality of information on the basis of "Own" air objects with a weight combination of information obtained by the radar surveillance systems under consideration. This would increase the likelihood of information being provided to decision makers in the airspace control system.

A sufficient number of scientific papers are devoted to the issue of combining information from joint radar surveillance systems. Thus, in [5], the combination of data for several sensors of surveillance systems in air traffic control is studied and it is shown that the creation of an excess of information allows improving the accuracy of tracking air objects and resistance to sensor errors.

[6-12] describes a set of algorithms combining primary radar information and identification system information. Pre-processing algorithms are described, which are used to remove false radar targets and preliminary processing of data of identification systems is given. Algorithms of combination of coordinates of air object are described, including alignment of coordinates of air objects obtained from various sensors, correlation between contacts, initiation of tracks, updating of tracks and processing of hypotheses of tracks. Various aspects of combination of information of considered information systems are considered and it is shown that during data merging it is possible to improve data quality due to weight combination of coordinate information of primary radar and identification systems and it is shown that accurate identification of air objects cannot be obtained when the identification system is used separately. The content of this article focuses on the algorithm for combining data from a network of radar surveillance systems, and the Bayesian network is considered as a merging algorithm.

The purpose of the work is to assess the quality of information support for consumers by surveillance radar systems for observing airspace with a combination of information from primary and identification radar systems.

Research results

Structure of information pooling of surveillance radar systems. Let us consider the structure of information support of users at the stage of initial processing of information by combined radar system, which includes primary and identification systems of observation. The Air Object (AO) Logbook provided to decision makers should include: spatial coordinates of the AO; information on the identification of AO on the basis of "own-alien".

It should be noted that the leader is the primary SS, the coordinate information of which is embedded in the logbook of AO. The calculation of AO coordinate information by identification systems is required only for the combination of information of primary and interrogative SS, which significantly reduces the information capabilities of interrogative SS and, as a consequence, reduces the quality of information support to users.

Automatic calculation of AO coordinate information by compatible SS processing channels and formation of AO logbook is performed at the stage of primary information processing. Thus, the information processing structure includes a single signal detector, from the output of which a sequence of random zeros and ones is removed. The optimal signal detection threshold is selected, usually according to the Neumann-Pearson test. Thus, the detection of signals is carried out according to the required quality indicators, ie a fixed probability of false alarm F_{0i} , and the probability of correct detection D_{0i} . In this case, the signal is quantized at two levels (binary quantization), which allows a direct synthesis of algorithms and decision rules for processing digital binary-quantized signals.

The sequence of zeros and ones from the output of the signal detector of each information system is temporally sampled and then goes to the inputs of the detector and the AO coordinate meter. The task of the AO detector is to decide in an optimal way whether the received sample is a bundle of signals or it refers to the interference based on the analysis of the obtained sequence of zeros and ones.

To solve the formulated problem, the AO detector must process the incoming signals according to some algorithm. The algorithm for detecting AO is reduced to testing the hypothesis H_0 of the absence of AO against an alternative hypothesis H_1 of its existence, ie to form a plausibility relationship and compare this relationship with some predetermined number, which is chosen based on the allowable probability of false detection. The decision to detect AO with quality indicators F_{1i} and D_{1i} comes to the AO coordinate meter. Estimation of the coordinates of the instantaneous position of the AO is done simultaneously with the detection of the AO. The task of the AO coordinate meter is to optimally estimate the spatial coordinates of the AO based on the analysis of the obtained sequence of zeros and ones.

To solve the formulated problem, the AO coordinate meter must also process the incoming signals

according to some algorithm. The optimal algorithm for measuring coordinates is synthesized, as a rule, by the criterion of maximum likelihood. The type of likelihood function depends on the statistical characteristics of the signals and interference, the shape of the antenna system pattern, as well as the method of scanning the SS antenna during the measurement process. Thus, when generating AO detection signals from the output of the AO coordinate meter of each channel of a compatible radar surveillance system, an estimate of the coordinate measurement vector $\hat{\alpha}$ is issued, which is characterized by a correlation matrix of errors \bar{C}^{-1} [11-13].

Based on the above, the information will be provided with partial indicators of the quality of information support will be the quality of the assessment of the coordinates of the observed air objects and the probability of correct detection of AO by each radar channel under consideration.

2. Evaluation of the quality of information combination of radar surveillance systems. Primary radar and identification systems of airspace control, as a rule, are placed on a single platform and carry out synchronous inspection of space. This allows to consider them as a common synchronous network of surveillance systems. Currently, to compile the logbook of the air object in each SS channel must be carried out [11]:

- detection and measurement of signal parameters (signal processing);
- detection and measurement of AO coordinates (primary information processing).

As shown in [12-14], an integral indicator of the quality of information support of the airspace control system can be the probability of information support, which, for the general case, can be written as follows

$$P_{inf} = D_{PR} \cdot D_{IFF} \cdot P_{por},$$

where D_{PR} - the probability of correct detection of AO by the primary radar, D_{IFF} - the probability of correct detection of AO by IFF system, P_{por} - probability of comparison of coordinate information of primary radar systems and identification systems.

The probability of comparing the coordinate information of the primary radar systems and identification systems P_{por} acts as the probability of combining the information of the considered information systems.

Further we will consider the issue of combining information without taking into account the information transmitted in the channel of identification systems.

The probability of correct detection of AO by each surveillance system $P_i = D_{1i}$ ($i=1,2$) $P_i = D_{1i}$, is a function

$$D_{1i} = f(D_{0i}, F_{0i}, P_0) = f(q_{0i}, z_{0i}, C_i, P_0),$$

where $z_0(C)$ - analog (digital) signal detection threshold (AO), q_{0i} - signal-to-noise ratio in the information processing channel, P_0 - the relative capacity of the aircraft responder, which is characteristic

of identification systems, $F_{0i} = f(z_{0i})$ - probability of false alarm.

The relative bandwidth of the IFF aircraft response systems can be written as

$$P_0 = f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_0, t_p, k_z), \quad (3)$$

where λ_1 - the intensity of the flow of request signals, which includes the flow of the considered requester, the flow of neighboring interrogators (intra-system interference) and the flow of correlated interference of the interested party; λ_2 - the intensity of the flow of request signals that cause the operation of the circuit suppression of the side lobes; λ_0 - the intensity of chaotic impulse interference in the request channel; t_p - the time of paralysis of the aircraft responder when servicing the request signal; k_z - the maximum load coefficient of the aircraft responder.

Due to the synchronicity of the primary radar systems and identification systems, it is possible to replace the processing at the level of detection and measurement of AO coordinates with a centralized one.

In this case, the structure of information processing must have in each channel a detector of individual signals, from the output of which is removed a sequence of random zeros and ones. The optimal detection threshold of these signals is selected according to the selected criterion.

Thus, the signal is detected by the required quality indicators, i.e. F_{0i}, D_{0i} .

Thus, when forming a decision on the detection of an air object from the output of the coordinate meter of the primary radar systems and identification systems, an estimate of the coordinate measurement vector $\hat{\alpha}$ is issued, which is characterized by a correlation matrix of measurement accuracy \hat{C}^{-1} .

In the information processing device, measurement estimates based on measurement vectors $\hat{\alpha}_p$ and a correlation matrix of measurement accuracy \hat{C}_p^{-1} of each information system are combined, as a result of which the outgoing measurement vector and the correlation matrix of accuracy are calculated. In the future, the outgoing measurement vector $\hat{\alpha}_p$ and the correlation accuracy matrix \hat{C}_p^{-1} are provided to the users.

The algorithm for combining information in the processing device is built, as a rule, so that the single marks of the channels of a compatible radar system are combined, if the azimuth angle between the centers of the packets does not exceed $\Delta\beta$, and the difference in their distances is Δr .

In this case, given that the deviations of the packet centers in the primary and secondary radars are independent and subject to normal distribution, the

probability of combining information packets can be determined from the following ratio

$$P_{por} = \frac{1}{4} \left[1 + \Phi \left(\frac{\Delta\beta}{\sqrt{2} \sqrt{\sigma_{\beta 1}^2 + \sigma_{\beta 2}^2}} \right) \right] \times \left[1 + \Phi \left(\frac{\Delta r}{\sqrt{2} \sqrt{\sigma_{r 1}^2 + \sigma_{r 2}^2}} \right) \right],$$

where $\sigma_{\beta 1}, \sigma_{\beta 2}, \sigma_{r 1}, \sigma_{r 2}$ - root mean square deviations of azimuths (ranges) of primary radar packet centers and identification system.

3. Analysis of information support structure for information processing of surveillance radar systems. We estimate the probability of information support of consumers of the airspace control system for the considered model of combination of information of primary radar systems and identification systems as a function

$$P_{inf} = f(k, q, P_0),$$

where $k = q_p / q_z$, q_z - signal-to-noise ratio in the channel of the identification system, q_p - signal-to-noise ratio in the channel of primary radar systems, taking into account both the detection and measurement of AO coordinates.

Detection of the air object and measurement of its coordinates will be carried out on the basis of the analysis of all pack of the received signal data of primary radar systems and identification systems. The digital detection threshold of the air object was equal to half the packet of received signals. The results of the calculation are shown in Fig. 1, 2. Calculations are obtained with the probability of false alarm detection of an air object that is $F = 10^{-3}$. In this case, the continuous curve corresponds to the probability of information support for the existing model and method of combining information.

Other dependences are obtained for the proposed variant of combining information for different coefficients of readiness of the aircraft responder and signal-to-noise ratios in the information processing channels of primary radar systems and identification systems.

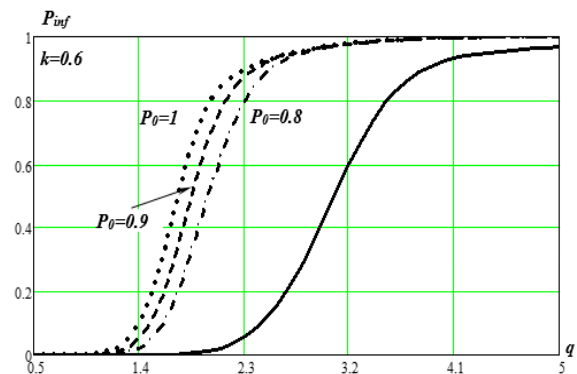


Fig. 1. Dependence $P_{inf} = f(k = 0.6, q, P_0)$

The calculations of the probability of information support of decision makers in the airspace use control

system presented in Fig. 1 show that for the signal-to-noise ratio of the primary radar and identification systems which is 0.6 while $q = 2.3$ the probability of information support for the existing model is only 0,05.

At that time, for the proposed model, the probability of information support is 0.8 for $P_0 = 0,8$; 0,88 for $P_0 = 0,9$ and 0,92 for $P_0 = 1$

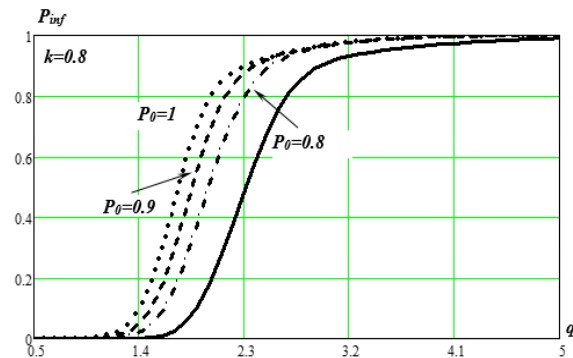


Fig. 2. Dependence $P_{inf} = f(k = 0.8, q, P_0)$

The calculations of the probability of information support of decision makers in the airspace use control system presented in Fig. 2 show that the signal / noise ratio of the primary radar and identification systems is 0.8, while $q = 2.3$ the probability of information support for the existing model is only 0.45.

At that time, for the proposed model, the probability of information support is also 0.8 for $P_0 = 0,8$; 0,88 for $P_0 = 0,9$ and 0,92 for $P_0 = 1$.

Conclusions

It is proved that changing the model of combining information of primary radar systems and identification systems which takes into account the estimated coordinates of the air object by the identification system due to the weight combination of coordinates of air objects calculated on the information of both primary radar systems and identification systems allows to improve quality.

Information services for decision-makers in the airspace use control system.

These calculations allow us to draw the following conclusions:

- the use of the proposed data processing of airspace surveillance systems, taking into account the possibility of using the equivalence of the fact of detection of an air object by the primary radar system and identification system is more appropriate than the existing model of information support of airspace use control system. information issued to the consumer;

- with the distributed processing of information of airspace surveillance systems decreases the impact of the coefficient of readiness of the aircraft respondent identification system quality of customer service.

REFERENCES

1. Bagad, V. S. (2009), *Radar System*, Technical Publications.
2. Bouwman, R. (2009), *Fundamentals of Ground Radar for Air Traffic Control Engineers and Technicians*, SciTech Publishing, Annotated edition. DOI: <https://doi.org/10.1049/SBRA008E>.
3. STANAG 4193 (2016), Document, Technical Characteristics Of IFF Mk X And Mk XII Interrogators And Transponders (Part V) - Technical Description Of The MkXII System, NATO Standard.
4. Malyarenko, A. S. (2007), *Secondary radar systems for air traffic control and state radar identification [Sistemy vtorichnoy radiolokatsii dlya upravleniya vozdushnym dvizheniyem i gosudarstvennogo radiolokatsionnogo opoznavaniya]*, Handbook, Kharkiv : KhUPS, 78 p.
5. Liu, W., Wei, J., Liang, M., Cao, Y. and Hwang, I. (2013), "Multi-Sensor Fusion and Fault Detection using Hybrid Estimation for Air Traffic Surveillance", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 49, no. 4, pp. 2323–2339. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.2013.6621819>.
6. Carson, R. R., Meyer, M. P. and Peters, D. J. (1996), "Fusion of IFF and radar data", *Proceeding of 1st Australian Data Fusion Symposium*, Adelaide, SA, Australia, pp. 65–70. DOI: <https://doi.org/10.1109/ADFS.1996.581083>.
7. Carson, R. R. J., Meyer, M. P. and Peters, D. J. (1997), "Fusion of IFF and radar data", *16th DASC. AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. Reflections to the Future. Proceedings*, Irvine, CA, USA, pp. 5.3–9. DOI: <https://doi.org/10.1109/DASC.1997.635094>.
8. Svyd, I., Obod, I., Maltsev, O., Tkachova, T. and Zavolodko, G. (2019), "Improving Noise Immunity in Identification Friend or Foe Systems", *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, pp. 73–77. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879812>.
9. Obod, I., Svyd, I., Maltsev, O. and Bakumenko, B. (2020), "Comparative Analysis of Noise Immunity Systems Identification Friend or Foe", *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, pp. 751–756. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088856>.
10. Schuck, T. M., Shoemaker, B. and Willey, J. (2000), "Identification friend-or-foe (IFF) sensor uncertainties, ambiguities, deception and their application to the multi-source fusion process", *Proceedings of the IEEE 2000 National Aerospace and Electronics Conference. NAECON 2000. Engineering Tomorrow (Cat. No.00CH37093)*, Dayton, OH, USA, pp. 85–94. DOI: <https://doi.org/10.1109/NAECON.2000.894896>.
11. Komorniczak, W., Pietrasinski, J. and Solaiman, B. (2002), "Data fusion approach to threat assessment for radar resources management", *SPIE 4731 Sensor Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications VI*. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.458384>.
12. Strelnytskyi, O., Svyd, I., Obod, I., Maltsev, O., Voloshchuk, O. and Zavolodko, G. (2019), "Assessment Reliability of Data in the Identification Friend or Foe Systems", *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, pp. 728–731. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783397>.

13. Svyd, I., Maltsev, O., Obod, I. and Zavolodko, G. (2020), "Fusion Method of Primary Surveillance Radar Data and ідентифікаційних системData", 2020 *IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Kyiv, Ukraine, pp. 336–340. DOI: <https://doi.org/10.1109/DESSERT50317.2020.9125040>.
14. Obod, I. I., Strelnytskyi O. O., Andrusевич, V. A. (2015), *Information network of airspace surveillance systems [Informatsiyna mrezhha system sposterezhedennya povitryanoho prostoru]*, Kharkiv : NURE, 271 p.

Received (Надійшла) 21.01.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 12.05.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Андрусевич Володимир Анатолійович – начальник управління інформаційних технологій та телекомунікаційних систем, Публічне акціонерне товариство «Південний гірничо-збагачувальний комбінат», Кривий Ріг, Україна;

Volodymyr Andrusевич – Head of the Department of Information Technologies and Telecommunication Systems, Southern Mining and Processing Plant Public Joint Stock Company, Kryvyi Rih, Ukraine,
e-mail: volodymyr.andrusевич@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0095-3584>.

Обод Іван Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Ivan Obod – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Microprocessor Technologies and Systems, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: ivan.obod@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9898-0937>.

Оцінка якості інформаційного забезпечення радіолокаційними системами спостереження повітряного простору

В. А. Андрусевич, І. І. Обод

Анотація. У роботі приділено увагу розгляду структури інформаційного забезпечення користувачів системи контролю повітряного простору на етапі первинної обробки інформації суміщеною радіолокаційною системою. Ця система включає первинну та ідентифікаційну системи спостереження, що дозволяє розглядати загальну структуру, як єдину синхронну мережу інформаційних систем спостереження. Така структура може характеризуватися загальним інтегральним показником якості інформаційного забезпечення системи контролю повітряного простору. Таким показником якості може бути імовірність інформаційного забезпечення, яка є добутком імовірностей правильного виявлення повітряного об'єкту первинним радіолокатором і системою ідентифікації за ознакою «свій-чужий» та імовірності порівняння координатної інформації первинних радіолокаційних систем й ідентифікаційних систем. Такий підхід дозволяє змінити модель поєднання інформації первинних радіолокаційних систем та ідентифікаційних систем так, щоб враховувати оцінені координати повітряного об'єкта обома інформаційними системами за рахунок вагового поєднання координат повітряних об'єктів. Розрахунок координат повітряних об'єктів за інформацією первинних радіолокаційних систем та ідентифікаційних систем дозволяє підвищити якість інформаційного забезпечення осіб, які приймають рішення в системі контролю використання повітряного простору.

Ключові слова: система контролю повітряного простору; первинні та вторинні радіолокаційні системи спостереження; оцінка якості інформаційного забезпечення; інтегральний показник якості обробки інформації; критерій Неймана-Пірсона.

Оценка качества информационного обеспечения радиолокационными системами наблюдения воздушного пространства

В. А. Андрусевич, И. И. Обод

Аннотация. В работе уделено внимание рассмотрению структуры информационного обеспечения пользователей системы контроля воздушного пространства на этапе первичной обработки информации совмещенной радиолокационной системой. Эта система включает первичную и идентификационную системы наблюдения, позволяет рассматривать общую структуру, как единую синхронную сеть информационных систем наблюдения. Такая структура может характеризоваться общим интегральным показателем качества информационного обеспечения системы контроля воздушного пространства. Таким показателем качества может быть вероятность информационного обеспечения, которая является произведением вероятностей правильного обнаружения воздушного объекта первичным радиолокатором и системой идентификации по признаку «свой-чужой» и вероятности сравнения координатной информации первичных радиолокационных систем и идентификационных систем. Такой подход позволяет изменить модель объединения информации первичных радиолокационных систем и идентификационных систем так, чтобы учитывать оценки координат воздушного объекта обеими информационными системами за счет весового сочетания координат воздушных объектов. Расчет координат воздушных объектов по информации первичных радиолокационных систем и идентификационных систем позволяет повысить качество информационного обеспечения лиц, принимающих решения в системе контроля использования воздушного пространства.

Ключевые слова: система контроля воздушного пространства; первичные и вторичные радиолокационные системы наблюдения; оценка качества информационного обеспечения; интегральный показатель качества обработки информации; критерий Неймана-Пирсона.

Lev Raskin¹, Oksana Sira¹, Yurii Parfenyuk¹, Larysa Sukhomlyn²

¹ National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute, Kharkiv, Ukraine

² Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine

STRUCTURAL OPTIMIZATION IN A MULTI-CHANNEL DISTRIBUTED MASS SERVICE SYSTEM

Abstract. Problem of structural optimization in a distributed service system is solved by the example of system "Production - delivery - consumption" for mass market product. In this regard, the purpose of work is to develop a method for structural optimization of "Production - delivery - mass consumption" system, by introducing and rational placement of intermediate production points based on solving clustering problems with taking into account the peculiarities of calculating distances between city objects. To achieve the goal of the work, it is necessary to solve the following tasks: clustering of city objects, using the metric of city blocks, for a given number of groups for selected location of production and grouping centers; finding the best location for a given number of clustering centers; determination of a rational number of clustering centers. Task was solved in three stages. First stage - clustering a set of consumption objects for given intermediate delivery centers locations. The second stage - finding the best locations for a given number of intermediate delivery centers. The third stage - determination of the rational number of intermediate centers. Formulated problem is solved according to two criteria: combined length of delivery routes product consumers and the probability that a random delivery time exceeds the critical value. The numerical value of the second criterion is calculated on the assumption that for each path may be estimated value of the mean and variance delivery time. The appropriate number of production centers is determined by a simple comparison of system efficiency for several realistically possible options. An example of clustering problem solving in the metric of "city blocks" on a directed graph by both criteria is given.

Keywords: distributed system "production - delivery - consumption"; clustering; directed graph; shortest path.

Introduction

Consider one of the many, important in practical sense, management tasks, come up in system "production - delivery - consumption". Let the city has l production centers of some consumer product. This product must be delivered to n its consumers. The natural desire to make this system as efficient as possible leads to the expediency of dividing the entire set of objects into groups, each of them can be serviced by the "nearest" production center.

This problem is solved by the methods of cluster analysis [1-4].

Cluster analysis is one of the central positions among data analysis techniques and is a set of methods and algorithms, designed to find some partition of the studied set of objects into subsets similar objects. In this case, the following requirements are usually imposed on the clustering results:

- each cluster must contain objects with similar values of properties or attributes;
- the set of all clusters must be exhaustive, that is, contain all objects of the studied population;
- none of the objects should belong to different clusters at the same time.

The position of each object is specified, in the simplest particular case, a point in a two-dimensional Cartesian coordinate system by vector $X^T = (x_1, x_2)$. Distance between a pair of points x_1 and x_2 measured, for example, in the Euclidean metric

$$R(x_1, x_2) = \sqrt{(x_{11} - x_{21})^2 + (x_{12} - x_{22})^2}. \quad (1)$$

In practice, other measures of points proximity are also used in [5, 6]:

– metric of "city blocks"

$$R(x_1, x_2) = |x_{11} - x_{21}| + |x_{12} - x_{22}|, \quad (2)$$

– metric P.L. Chebyshev

$$R(x_1, x_2) = \max\{|x_{11} - x_{21}| + |x_{12} - x_{22}|\}, \quad (3)$$

– Minkowski metric

$$R(x_1, x_2) = \left((x_{11} - x_{21})^p + (x_{12} - x_{22})^p \right)^{1/q}. \quad (4)$$

Metric (4) in special case when $p = q$, is converted to metric (2). But if $p = 2$, then the Euclidean metric will be obtained (1). Solving a specific clustering problem for each of points to be grouped using one of the formulas (1) – (4), found distance to the grouping centers is calculated and selected closest of them.

Returning to formulated task of structural organization in system "production - delivery - consumption", it should be noted that this task has a fundamental feature that distinguishes it from standard, traditional grouping tasks.

Difference lies in the method of distance calculating between grouping objects, and the distance for any two points of the city can not be correctly calculated in any of metrics shown above. It is determined by total length of the route, consisting from relevant sections of urban highways.

In this regard, **the purpose of work** is to develop a method for structural optimization of "Production - delivery - mass consumption" system, by introducing and rational placement of intermediate production points based on solving clustering problems with taking into account the peculiarities of calculating distances between city objects.

Formulation of the problem.

To achieve the goal of the work, it is necessary to solve the following tasks:

- clustering of city objects, using the metric of city blocks, for a given number of groups for selected location of production and grouping centers;
- finding the best location for a given number of clustering centers;
- determination of a rational number of clustering centers.

Main results

Let's start by solving the first task from the list. An adequate mathematical model of this problem can be obtained using the graph, containing a set of vertices and arcs connecting these vertices. Moreover, for an arc connecting directly a pair of vertices i and j , its length is indicated by r_{ij} , the totality of which all the arcs of the graph shows the matrix $R^{(1)} = (r_{ij})$. In solving the clustering problem of vertices there is a need to calculate the distance between any pair of vertices. To calculate these distances, it is natural to use algorithm Floyd - Warshall [7], the essence of which is as follows. If the transition from the top i to the top j possible through one of the many intermediate vertices $k \in \{1, 2, \dots, l\}$, then shortest route from i to j determined by relation

$$r_{ij} = \min_k \left\{ \begin{matrix} r_{i1} + r_{1j}, r_{i2} + r_{2j}, \dots, \\ r_{ik} + r_{kj}, \dots, r_{ie} + r_{ej} \end{matrix} \right\}. \quad (5)$$

Let introduce a matrix generalization of relation (5):

$$R^{(2)} = R^{(1)} \otimes R^{(1)}, \quad (6)$$

where the operation \otimes implements calculation by formula (5), i.e

$$r_{ij}^{(2)} = \min_k \left\{ \begin{matrix} r_{i1}^{(1)} + r_{1j}^{(1)}, r_{i2}^{(1)} + r_{2j}^{(1)}, \dots, \\ r_{ik}^{(1)} + r_{kj}^{(1)}, \dots, r_{ie}^{(1)} + r_{ej}^{(1)} \end{matrix} \right\}. \quad (7)$$

The matrix $R^{(2)} = (r_{ij}^{(2)})$ defines the set of shortest two-step paths between the graph vertices. Further, to find the matrix of shortest three-step paths, we use a matrix relation similar to (6)

$$R^{(3)} = R^{(1)} \otimes R^{(2)}, \quad (8)$$

where

$$r_{ij}^{(3)} = \min_k \left\{ \begin{matrix} r_{i1}^{(1)} + r_{1j}^{(2)}, r_{i2}^{(1)} + r_{2j}^{(2)}, \dots, \\ r_{ik}^{(1)} + r_{kj}^{(2)}, \dots, r_{ie}^{(1)} + r_{ej}^{(2)} \end{matrix} \right\}. \quad (9)$$

Note that relation (9) essentially embodies the well-known principle of dynamic programming [8], according to which the optimal multistep control is determined by the best choice of options set: { initial step + optimal continuation of state, occurring after the initial step }.

Consider an example of introduced relations using to solve the following simple clustering problem. Let the locations of two certain production centers, of a product, and nine centers of its consumption be determined in the city, as well as the highways of the city along with their intersections (Fig. 1).

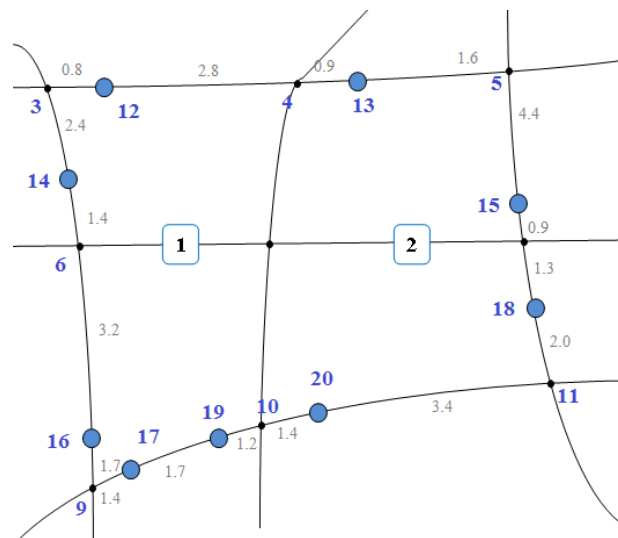


Fig. 1. Transport network configuration (2 suppliers, 9 consumers)

The collection of all these points defines a graph with 20 vertices along with a set of arcs, connecting some of them. The lengths of these arcs are defined by the matrix (Tabl. 1). In this matrix the symbol M , located in i -th line and j -th column, corresponds to a situation where points i and j are not interconnected directly.

Table 1 – Matrix of distances between transport network points

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	M	M	M	M	1,5	1,5	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
2	M	0	M	M	M	M	1,4	1,6	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
3	M	M	0	3,6	M	3,8	M	M	M	M	M	0,8	M	2,4	M	M	M	M	M	M
4	M	M	4,2	0	2,3	M	4,1	M	M	M	M	2,8	0,9	M	M	M	M	M	M	M
5	M	M	M	2,3	0	M	M	5,1	M	M	M	M	1,6	M	4,4	M	M	M	M	M
6	M	M	3,7	M	M	0	3,1	M	4,9	M	M	M	M	1,4	M	3,2	M	M	M	M
7	1,5	1,4	M	4,1	M	3,1	0	3,0	M	4,2	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
8	M	1,6	M	M	5,1	M	3,0	0	M	M	3,3	M	M	M	0,9	M	M	1,3	M	M

End of Table 1

9	M	M	M	M	M	4,9	M	M	0	4,3	M	M	M	M	M	1,7	1,4	M	2,9	M
10	M	M	M	M	M	M	4,2	M	4,3	0	5,1	M	M	M	M	M	3,0	M	1,2	1,4
11	M	M	M	M	M	M	M	3,3	M	5,1	0	M	M	M	M	M	M	2,0	M	3,4
12	M	M	0,8	2,8	M	M	M	M	M	M	M	0	M	M	M	M	M	M	M	M
13	M	M	M	0,9	0,9	1,6	M	M	M	M	M	M	0	M	3,3	M	M	M	M	M
14	M	M	2,4	M	1,4	M	M	M	M	M	M	M	0	M	M	M	M	M	M	M
15	M	M	M	M	4,4	M	M	0,9	M	M	M	M	3,3	M	0	M	M	M	M	M
16	M	M	M	M	M	3,2	M	M	1,7	M	M	M	M	M	0	M	M	M	M	M
17	M	M	M	M	M	M	M	M	1,4	2,7	M	M	M	M	M	M	0	M	1,7	3,8
18	M	M	M	M	M	M	M	1,3	M	M	2,0	M	M	M	M	M	M	0	M	M
19	M	M	M	M	M	M	1,4	M	M	1,2	M	M	M	M	M	M	1,7	M	0	M
20	M	M	M	M	M	M	M	M	M	1,4	3,4	M	M	M	M	M	M	M	M	0

We calculate the matrix of two-step shortest paths between points using (7). We have:

$$r_{12}^{(2)} = \min \left\{ r_{16}^{(1)} + r_{62}^{(1)}, r_{17}^{(1)} + r_{72}^{(1)} \right\} = \min \{ 1.5 + M, 1.5 + 1.4 \} = 2.9;$$

$$r_{13}^{(2)} = \min \left\{ r_{16}^{(1)} + r_{63}^{(1)}, r_{17}^{(1)} + r_{73}^{(1)} \right\} = \min \{ 1.5 + 3.8, 1.5 + M \} = 5.3;$$

$$r_{14}^{(2)} = \min \left\{ r_{16}^{(1)} + r_{64}^{(1)}, r_{17}^{(1)} + r_{74}^{(1)} \right\} = \min \{ 1.5 + M, 1.5 + 4.1 \} = 5.6;$$

$$r_{15}^{(2)} = M, \text{ since there is no two-step path between points 1 and 5,}$$

$$r_{16}^{(2)} = r_{16}^{(1)} = 1.5, r_{17}^{(2)} = r_{17}^{(1)} = 1.5;$$

$$r_{18}^{(2)} = \min \left\{ r_{16}^{(1)} + r_{68}^{(1)}, r_{17}^{(1)} + r_{78}^{(1)} \right\} = \min \{ 1.5 + M, 1.5 + 3.0 \} = 4.5;$$

$$r_{19}^{(2)} = \min \left\{ r_{16}^{(1)} + r_{69}^{(1)}, r_{17}^{(1)} + r_{79}^{(1)} \right\} = \min \{ 1.5 + 4.9, 1.5 + M \} = 6.4;$$

$$r_{1,10}^{(2)} = \min \left\{ r_{16}^{(1)} + r_{6,10}^{(1)}, r_{17}^{(1)} + r_{7,10}^{(1)} \right\} = \min \{ 1.5 + M, 1.5 + 4.2 \} = 5.7;$$

$$r_{1,11}^{(2)} = r_{1,12}^{(2)} = r_{1,13}^{(2)} = M, \text{ since there are no corresponding two-step paths;}$$

$$r_{1,14}^{(2)} = \min \left\{ r_{16}^{(1)} + r_{6,14}^{(1)}, r_{17}^{(1)} + r_{7,14}^{(1)} \right\} = \min \{ 1.5 + 1.4, 1.5 + M \} = 2.9;$$

$$r_{15}^{(2)} = M;$$

$$r_{1,16}^{(2)} = \min \left\{ r_{16}^{(1)} + r_{6,16}^{(1)}, r_{17}^{(1)} + r_{7,16}^{(1)} \right\} = \min \{ 1.5 + 3.2, 1.5 + M \} = 4.7;$$

$$r_{1,17}^{(2)} = r_{1,18}^{(2)} = r_{1,18}^{(2)} = M, \text{ since there are no corresponding two-step paths;}$$

$$r_{21}^{(2)} = \min \left\{ r_{27}^{(1)} + r_{71}^{(1)}, r_{28}^{(1)} + r_{81}^{(1)} \right\} = \min \{ 1.4 + 1.5, 1.6 + M \} = 2.9;$$

$$r_{23}^{(2)} = M;$$

$$r_{24}^{(2)} = \min \left\{ r_{27}^{(1)} + r_{74}^{(1)}, r_{28}^{(1)} + r_{84}^{(1)} \right\} = \min \{ 1.4 + 4.1, 1.6 + M \} = 5.5;$$

$$r_{25}^{(2)} = \min \left\{ r_{27}^{(1)} + r_{75}^{(1)}, r_{28}^{(1)} + r_{85}^{(1)} \right\} = \min \{ 1.4 + M, 1.6 + 5.3 \} = 6.9;$$

$$r_{26}^{(2)} = \min \left\{ r_{27}^{(1)} + r_{76}^{(1)}, r_{28}^{(1)} + r_{86}^{(1)} \right\} = \min \{ 1.4 + 3.0, 1.6 + M \} = 4.4;$$

$$r_{27}^{(2)} = r_{27}^{(1)} = 1.4, r_{28}^{(2)} = r_{28}^{(1)} = 1.6, r_{29}^{(2)} = M;$$

$$r_{2,10}^{(2)} = \min \left\{ r_{27}^{(1)} + r_{7,10}^{(1)}, r_{28}^{(1)} + r_{8,10}^{(1)} \right\} = \min \{ 1.4 + 4.2, 1.6 + M \} = 5.6;$$

$$r_{2,11}^{(2)} = \min \left\{ r_{27}^{(1)} + r_{7,11}^{(1)}, r_{28}^{(1)} + r_{8,11}^{(1)} \right\} = \min \{ 1.4 + M, 1.6 + 3.3 \} = 4.9;$$

$$r_{2,12}^{(2)} = r_{2,13}^{(2)} = r_{2,14}^{(2)} = M, \text{ since there are no corresponding two-step paths;}$$

$$r_{2,15}^{(2)} = \min \left\{ r_{27}^{(1)} + r_{7,15}^{(1)}, r_{28}^{(1)} + r_{8,15}^{(1)} \right\} = \min \{ 1.4 + M, 1.6 + 0.9 \} = 2.5;$$

$$r_{2,16}^{(2)} = r_{2,17}^{(2)} = M;$$

$$r_{2,18}^{(2)} = \min \left\{ r_{27}^{(1)} + r_{7,18}^{(1)}, r_{28}^{(1)} + r_{8,18}^{(1)} \right\} = \min \{ 1.4 + M, 1.6 + 1.3 \} = 2.9;$$

$r_{2,19}^{(2)} = r_{2,20}^{(2)} = M$, since there are no corresponding two-step paths.

Continuing similarly for the remaining possible paths, we fill in the matrix $R^{(2)}$ (Table 2).

Table 2 – Matrix of the lengths for shortest two-step paths

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	2,9	5,3	5,6	6,1	1,5	1,5	4,5	6,4	5,7	M	M	M	2,9	M	4,7	M	M	M	M
2	2,9	0	M	5,5	6,9	4,4	1,4	1,6	M	5,6	4,9	M	M	M	2,5	M	M	2,9	M	M
3	5,3	M	0	3,6	6,7	3,8	6,8	M	8,7	M	M	0,8	4,5	2,4	M	7,0	M	M	M	M
4	5,6	5,5	3,6	0	2,5	8,0	4,1	7,8	M	8,3	M	2,8	0,9	6,0	6,9	M	M	M	M	M
5	6,1	6,9	6,7	2,5	0	M	6,6	5,3	M	M	8,6	5,3	1,6	M	4,4	M	M	6,6	M	M
6	1,5	4,4	3,8	8,0	M	0	3,0	6,0	4,9	7,2	M	4,6	M	1,4	M	3,2	6,3	M	8,0	M
7	1,5	1,4	6,8	4,1	6,6	3,0	0	3,0	7,9	4,2	6,3	6,9	5,0	4,4	3,9	6,2	7,1	4,3	5,4	5,6
8	4,5	1,6	M	7,9	5,3	6,0	3,0	0	M	7,2	3,3	M	6,9	M	0,9	M	M	1,3	M	6,7
9	6,4	M	8,7	M	M	4,9	7,9	M	0	4,3	9,1	M	M	6,3	M	1,7	1,4	M	3,1	5,7
10	5,7	5,6	M	8,3	M	7,2	4,2	7,2	4,3	0	4,8	M	M	M	M	6,0	2,9	6,8	1,2	1,4
11	M	4,9	M	M	8,6	M	6,3	3,3	9,1	4,8	0	M	M	M	4,2	M	7,7	2,0	6,0	3,4
12	M	M	0,8	2,8	5,3	4,6	6,9	M	M	M	M	0	3,7	3,2	M	M	M	M	M	M
13	M	M	4,5	0,9	1,6	M	5,0	6,9	M	M	M	3,7	0	M	6,0	M	M	M	M	M
14	2,9	M	2,4	6,0	M	1,4	4,4	M	6,3	M	M	3,2	M	0	M	4,6	M	M	M	M
15	M	2,5	M	6,9	4,4	M	3,9	0,9	M	M	4,2	M	6,0	M	0	M	M	2,2	M	M
16	4,7	M	7,0	M	M	3,2	6,0	M	1,7	6,0	M	M	M	4,6	M	0	3,1	M	4,8	M
17	M	M	M	M	M	6,3	7,1	M	1,4	2,9	7,7	M	M	M	M	3,1	0	M	1,7	4,3
18	M	2,9	M	M	6,6	M	4,3	1,3	M	6,8	2,0	M	M	M	2,2	M	M	0	M	5,4
19	M	M	M	M	M	8,0	5,4	M	3,1	1,2	6,0	M	M	M	M	4,8	1,7	M	0	2,6
20	M	M	M	M	M	M	5,6	6,7	5,7	1,4	3,4	M	M	M	M	M	4,3	5,4	2,6	0

From the resulting matrix analysis it follows, that using of shortest two-step paths from production points (№1 and №2) most consumption points (12-20) is unattainable.

Continuing of procedure, we calculate three-step matrix paths using the formula (9).

We get:

$$r_{12}^{(3)} = r_{12}^{(2)}, \quad r_{13}^{(3)} = r_{13}^{(2)},$$

$$r_{14}^{(3)} = r_{14}^{(2)}, \quad r_{15}^{(3)} = r_{15}^{(2)},$$

$$r_{16}^{(3)} = r_{16}^{(2)}, \quad r_{17}^{(3)} = r_{17}^{(2)},$$

$$r_{18}^{(3)} = r_{18}^{(2)}, \quad r_{19}^{(3)} = r_{19}^{(2)}, \quad r_{1,10}^{(3)} = r_{1,10}^{(2)},$$

$$r_{1,11}^{(3)} = \min \left\{ r_{16}^{(1)} + r_{6,11}^{(2)}, r_{17}^{(1)} + r_{7,11}^{(2)} \right\} = \min \{ 1.5 + M, 1.5 + 6.3 \} = 7.8,$$

$$r_{1,11}^{(3)} = \min \left\{ r_{16}^{(1)} + r_{6,11}^{(2)}, r_{17}^{(1)} + r_{7,11}^{(2)} \right\} = \min \{ 1.5 + M, 1.5 + 6.3 \} = 7.8,$$

$$r_{1,12}^{(3)} = \min \left\{ r_{16}^{(1)} + r_{6,12}^{(2)}, r_{17}^{(1)} + r_{7,12}^{(2)} \right\} = \min \{ 1.5 + 4.6, 1.5 + 6.9 \} = 6.1,$$

$$r_{1,13}^{(3)} = \min \left\{ r_{16}^{(1)} + r_{6,13}^{(2)}, r_{17}^{(1)} + r_{7,13}^{(2)} \right\} = \min \{ 1.5 + M, 1.5 + 5.0 \} = 6.5,$$

$$r_{1,15}^{(3)} = \min \left\{ r_{16}^{(1)} + r_{6,15}^{(2)}, r_{17}^{(1)} + r_{7,15}^{(2)} \right\} = \min \{ 1.5 + M, 1.5 + 3.9 \} = 5.4,$$

$$r_{1,16}^{(3)} = \min \left\{ r_{16}^{(1)} + r_{6,16}^{(2)}, r_{17}^{(1)} + r_{7,16}^{(2)} \right\} = \min \{ 1.5 + 3.2, 1.5 + 6.2 \} = 4.7,$$

$$r_{1,17}^{(3)} = \min \left\{ r_{16}^{(1)} + r_{6,17}^{(2)}, r_{17}^{(1)} + r_{7,17}^{(2)} \right\} = \min \{ 1.5 + 6.3, 1.5 + 7.1 \} = 7.8,$$

$$r_{1,18}^{(3)} = \min \left\{ r_{16}^{(1)} + r_{6,18}^{(2)}, r_{17}^{(1)} + r_{7,18}^{(2)} \right\} = \min \{ 1.5 + M, 1.5 + 4.3 \} = 5.8,$$

$$r_{1,19}^{(3)} = \min \left\{ r_{16}^{(1)} + r_{6,19}^{(2)}, r_{17}^{(1)} + r_{7,19}^{(2)} \right\} = \min \{ 1.5 + 8.0, 1.5 + 5.4 \} = 6.9,$$

$$r_{1,20}^{(3)} = \min \left\{ r_{16}^{(1)} + r_{6,20}^{(2)}, r_{17}^{(1)} + r_{7,20}^{(2)} \right\} = \min \{ 1.5 + M, 1.5 + 5.6 \} = 7.1.$$

Continuing in the same way, we get:

$$r_{2,12}^{(3)} = \min \left\{ r_{27}^{(1)} + r_{7,12}^{(2)}, r_{28}^{(1)} + r_{8,12}^{(2)} \right\} = \min \{1.4 + 6.9, 1.6 + M\} = 8.3,$$

$$r_{2,13}^{(3)} = \min \left\{ r_{27}^{(1)} + r_{7,13}^{(2)}, r_{28}^{(1)} + r_{8,13}^{(2)} \right\} = \min \{1.4 + 5.0, 1.6 + 6.9\} = 6.4,$$

$$r_{2,14}^{(3)} = \min \left\{ r_{27}^{(1)} + r_{7,14}^{(2)}, r_{28}^{(1)} + r_{8,14}^{(2)} \right\} = \min \{1.4 + 4.4, 1.6 + M\} = 5.8,$$

$$r_{2,15}^{(3)} = \min \left\{ r_{27}^{(1)} + r_{7,15}^{(2)}, r_{28}^{(1)} + r_{8,15}^{(2)} \right\} = \min \{1.4 + 3.9, 1.6 + 0.9\} = 2.5,$$

$$r_{2,16}^{(3)} = \min \left\{ r_{27}^{(1)} + r_{7,16}^{(2)}, r_{28}^{(1)} + r_{8,16}^{(2)} \right\} = \min \{1.4 + 6.2, 1.6 + M\} = 7.6,$$

$$r_{2,17}^{(3)} = \min \left\{ r_{27}^{(1)} + r_{7,17}^{(2)}, r_{28}^{(1)} + r_{8,17}^{(2)} \right\} = \min \{1.4 + 7.1, 1.6 + M\} = 8.5,$$

$$r_{2,18}^{(3)} = \min \left\{ r_{27}^{(1)} + r_{7,18}^{(2)}, r_{28}^{(1)} + r_{8,18}^{(2)} \right\} = \min \{1.4 + 4.3, 1.6 + 1.3\} = 2.9,$$

$$r_{2,19}^{(3)} = \min \left\{ r_{27}^{(1)} + r_{7,19}^{(2)}, r_{28}^{(1)} + r_{8,19}^{(2)} \right\} = \min \{1.4 + 5.4, 1.6 + M\} = 6.8,$$

$$r_{2,20}^{(3)} = \min \left\{ r_{27}^{(1)} + r_{7,20}^{(2)}, r_{28}^{(1)} + r_{8,20}^{(2)} \right\} = \min \{1.4 + 5.6, 1.6 + 6.7\} = 7.0.$$

Performed calculations show us that for each of consumption points there is exists and is found the shortest three-step route from each of production centers.

The respective paths lengths are calculated, summarized in Table 3 and can be used for comparison for clustering purposes.

Table 3 – Lengths of the shortest routes from production centers to consumption points

Production centers	Consumption points								
	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	6,1	6,5	2,9	5,4	4,7	7,8	5,8	6,9	7,1
2	8,3	6,4	5,8	2,5	7,6	8,5	2,9	6,8	7,0

Distances comparison from production centers (1 and 2) to delivery points (12 - 20) makes it possible to form clusters as follows:

Cluster 1: points 12, 14, 16, 17,

Cluster 2: points 13, 15, 18, 19, 20.

Solution obtained.

In delivery system of perishable products (or products of immediate use), another criterion is more important than distance to the delivery points - delivery time. The values calculation of this parameter must be carried out taking uncertainty into account, arising due to differences in some section's throughput of highways, dynamics of the flow density for transport units, road surface quality, depending on weather conditions, time of day, etc. In suppose that according to results of preliminary processing of the corresponding data for all transport network sections, shown in Fig. 1, average values of the duration in overcoming these sections and their variance have been determined. Then, using this data for any route, the probability that random duration of the delivery time will exceed a critical value can be calculated. Moreover, if for some specific route, the average time to overcome it is m , and the variance is $-\sigma^2$, then, assuming a normal distribution of this time, probability of exceeding the critical value is calculated by formula

$$P(T \geq T_{kp}) = \int_{T_{kp}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \left\{ -\frac{(T-m)^2}{\sum \sigma^2} \right\} dT.$$

Calculation results are summarized in Table 4.

Table 4 – Probabilities of critical value exceeding by the random delivery time

Production centers	Consumption points								
	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0,45	0,41	0,16	0,47	0,43	0,61	0,44	0,47	0,51
2	0,72	0,54	0,51	0,13	0,68	0,79	0,19	0,59	0,68

Data comparison presented in table 4 leads to the following clustering of consumption points:

Cluster 1: points 12, 13, 14, 16, 17, 19, 20,

Cluster 2: points 15, 18.

Thus, the result of clustering by the time criterion is radically different from the previous one, obtained taking into account only the distances between the centers of production and points of consumption.

The considered clustering problem becomes more complicated if the proximity measures of objects are determined indistinctly [9-12]. Application methods of fuzzy mathematics in this case, is absolutely justified, since practical tasks, similar to the above, are solved in a situation where actual available initial data is insufficient to obtain a correct theoretical and probabilistic description of them. Methods of the fuzzy mathematics theory are less demanding and are better suited for constructing adequate mathematical models in a small sample of these data, since they do not need to correctly reconstruct the unknown distribution density of the corresponding random variables. Consider a possible approach to clustering problem solving in terms of fuzzy mathematics. We will assume that the duration measures of overcoming network sections are determined by fuzzy numbers (L-R) type with their own membership functions. Consider the technology for

fuzzy value calculating of the integral metric for a fragment of a route composed from two consecutive sections. We introduce two corresponding fuzzy numbers η_1, η_2 (L-R) type, that determine performance of these two sections in the network:

$$\eta_1 = \langle m_1, \alpha_1, \beta_1 \rangle, \eta_2 = \langle m_2, \alpha_2, \beta_2 \rangle. \quad (7)$$

Here: m_1, m_2 – modal values of the numbers F1 and F2, α_1, α_2 –left fuzziness coefficients values of the membership functions in numbers F1 and F2 ; β_1, β_2 - right fuzziness coefficients values of the membership functions in numbers F1 and F2.

To calculate integral metric that determines the level of preference for a network fragment, consisting of given two sections, it is necessary to define the rules for performing the following operations on fuzzy numbers (L-R) type: addition, multiplication, selection of the minimum value, division. We define these rules by formulas justified in [13]:

– addition:

$$\begin{aligned} \langle m, \alpha, \beta \rangle &= \langle m_1, \alpha_1, \beta_1 \rangle + \langle m_2, \alpha_2, \beta_2 \rangle, \\ m &= m_1 + m_2; \alpha = \alpha_1 + \alpha_2; \beta = \beta_1 + \beta_2; \end{aligned} \quad (8)$$

– multiplication

$$\begin{aligned} \langle m, \alpha, \beta \rangle &= \langle m_1, \alpha_1, \beta_1 \rangle \cdot \langle m_2, \alpha_2, \beta_2 \rangle, \\ m &= m_1 \cdot m_2; \alpha = m_1 \alpha_2 + m_2 \alpha_1 - \alpha_1 \alpha_2; \\ \beta &= m_1 \beta_2 + m_2 \beta_1 + \beta_1 \beta_2; \end{aligned} \quad (9)$$

– division

$$\begin{aligned} \langle m, \alpha, \beta \rangle &= \langle m_1, \alpha_1, \beta_1 \rangle : \langle m_2, \alpha_2, \beta_2 \rangle, \\ m &= \frac{m_1}{m_2}; \alpha = \frac{m_2 \alpha_1 + m_1 \beta_2}{m_2(m_2 + \beta_2)}; \beta = \frac{m_1 \alpha_2 + m_2 \beta_1}{m_2(m_2 - \alpha_2)} \end{aligned} \quad (10)$$

– selection of the minimum value

$$\langle m, \alpha, \beta \rangle = \min\{\langle m_1, \alpha_1, \beta_1 \rangle, \langle m_2, \alpha_2, \beta_2 \rangle\}.$$

A natural and easily interpreted rule for choosing the lesser of two numbers is formulated as follows: if the difference between these two numbers is positive, then the subtracted is the smaller; if the difference between these numbers is negative, the minuend is smaller..

Define a rule perform the subtraction operation:

$$\begin{aligned} \langle m, \alpha, \beta \rangle &= \langle m_1, \alpha_1, \beta_1 \rangle - \langle m_2, \alpha_2, \beta_2 \rangle, \\ m &= m_1 - m_2; \alpha = \alpha_1 + \beta_2; \beta = \beta_1 + \alpha_2. \end{aligned} \quad (11)$$

Thus, the problem of determining the smaller of two fuzzy numbers is reduced to analyzing subtraction result. In accordance with this, a simple and understandable rule for comparing two fuzzy numbers is formulated as follows.

For numbers being compared η_1 и η_2 calculate values of the left (b_1, b_2) and right (c_1, c_2) their carriers borders:

$$\begin{aligned} b_1 &= m_1 - \alpha_1, c_1 = m_1 + \beta_1, \\ b_2 &= m_2 - \alpha_2, c_2 = m_2 + \beta_2. \end{aligned}$$

Now comparing rule is formulated as follows:

a) if $\min\{(b_1 - b_2), (c_1 - c_2)\} > 0$, then $F_1 > F_2$,

b) if $\max\{(b_1 - b_2), (c_1 - c_2)\} < 0$, then $F_1 < F_2$,

c) if $\min\{(b_1 - b_2), (c_1 - c_2)\} < 0$ and

$|\min\{(b_1 - b_2), (c_1 - c_2)\}| > \max\{(b_1 - b_2), (c_1 - c_2)\}$,
then $F_1 < F_2$,

d) if $\min\{(b_1 - b_2), (c_1 - c_2)\} < 0$ and

$|\min\{(b_1 - b_2), (c_1 - c_2)\}| < \max\{(b_1 - b_2), (c_1 - c_2)\}$,
then $F_1 > F_2$.

The above ratios provide a calculation by the formula (7) values of fuzzy measures of the distance for each point to the clusters centers. These values are used when performing clustering procedure.

Problem of clustering is even more problematic if the initial data are specified inaccurately in the sense of Pavlak. [14-16]. Real way to solve problem in this case is to use the method of constructing fuzzy models for objects that are determined inaccurately [17].

Method for solving the second problem for a given number l clusters uses an iterative procedure consisting of preliminary and subsequent stages. At the preliminary stage, the initial location of grouping centers is found. To do this, a Cartesian coordinate system is applied to the city map so that the abscissa of the leftmost of the grouping objects and the ordinate of the lowest of the objects are equal to zero. Then a rectangle is constructed, the lower left vertex of which is placed at the origin. (0,0), and the upper right vertex is chosen so that all the objects of the city lie within this rectangle, and he had a minimum area. Now we find the center of the rectangle at the intersection of its diagonals, from which we draw l rays with an angle $\alpha = 360^\circ / l$ between them. Then we find point of rays intersection with the rectangular sides and segments midpoints formed in this case. The resulting points are used to determine the initial grouping centers by finding the nearest point on the nearest highway. Each of the subsequent iterations consists of two steps. At the first step, according to the method described above, clustering problem is solved. According to results of this task is calculated clustering quality criterion, equal to sum of the distances from grouping objects to corresponding grouping centers.

Let be:

(X_{KO}, Y_{KO}) – grouping center coordinates K -th cluster, $K = 1, 2, \dots, l$,

(X_{KS}, Y_{KS}) – coordinates S -th object from K -th cluster.

Then

$$\eta_K = \sum_{S \in N_K} \sqrt{(X_{K0} - X_{KS})^2 + (Y_{K0} - Y_{KS})^2} \quad (12)$$

sum of distances from grouping center K -th cluster to objects of this cluster, $S \in N_K$,

N_K - many numbers of objects that fall into the K -th cluster;

$$\eta = \sum_{K=1}^l \eta_K \quad (13)$$

sum of all routes lengths, which were obtained as a result of clustering.

It is clear that criterion (13) value is lower, the higher quality of clustering. In the second step, the grouping results are used to correct the positions of the grouping centers. To do this, within each cluster, it is necessary to find a point, the sum of distances from which to the objects of this cluster is minimal. This task can be solved as follows. From center of the cluster will hold K лучей rays (for example $K = 4$) with an angle between them $\beta = 360^\circ / K$. Then, for each of objects in each of resulting sectors, we find the shortest distance to grouping center (by formula (7), we sum them up and among the resulting sums we find the greatest. Correction of cluster grouping center position consists in its movement along bisector of the sector with greatest sum of distances to intersection with nearest highway. New positions of the grouping centers obtained in this case are used at the first step of next iteration. Effectiveness of this clustering is estimated by formulas (12), (13). The procedure continues if new value of criterion (13) is better than the previous one. As a result of solving this problem, the best position of clustering centers for a given number of clusters will be obtained.

Finally, let's move on to the third task. Simplest for implementation and a reliable way to solve it is to solve the complex of first and second problems sequentially, first for two clusters, then for three, etc. Comparison of criterion calculated values (13) for these options provides choice of the best.

Conclusions

1. Problem of structural optimization in the distributed system "production - delivery - consumption" is considered and solved. The problem is solved in three stages.

2. At the first stage, problem of distributing a set of consumers into clusters was solved. Optimization criterion - is total length of delivery routes in the city blocks metric. To solve the problem, proposed method that implements the technology of dynamic programming.

The method is generalized for case when the initial data is not clearly specified. An alternative approach to solving problem of clustering according to criterion is also considered - minimum probability that the delivery time will exceed a given threshold value.

3. At the second stage, problem of rational location finding a for a given number of production points was solved. To solve that problem, a procedure for sequential improvement of initial plan is implemented.

The appropriate number of production centers is determined by a simple comparison of system efficiency for several realistically possible options.

REFERENCES

1. Aivazyan S.A., Bukhshtaber, V.M., Enyukov, I.S. and Meshalkin, L.D. (1989), *Applied statistics: Classification and dimension reduction*, Finance and statistics, Moscow, 607 p. (in Russian).
2. Mandel, I.D. (1988), *Cluster analysis*, Finance and statistics, Moscow, 176 p. (in Russian).
3. Khaidukov, D.S. (2009), "Application of cluster analysis in public administration", *Philosophy of mathematics: topical problems*, MAKS Press, Moscow, 287 p. (in Russian).
4. , Raizin, J. Van (1980), *Classification and cluster*, Mir, Moscow, 390 p. (in Russian).
5. Amelkin, S. A., Zakharov, A. V. and Khachumov, V. M. (2006), "Generalized Euclidean-Mahalanobis distance and its properties", *Information technology and computing systems*, No. 4, pp. 40-44 (in Russian).
6. Khachumov, M.V.,(2011), "On the choice of metrics for solving classification and clustering problems", Materials of the First All-Russian Scientific Conference with International Participation (SASM-2011) "System Analysis and Semiotic Modeling", Kazan, February 24-28, Publishing House "Fen" Academy of Sciences, Kazan (in Russian).
7. Belousov, A. I. and Tkachev, S. B. (2006), *Discrete mathematics*, MGTU, Moscow, 744 p., ISBN 5-7038-2886-4 (in Russian).
8. Bellman, R. (1960), *Dynamic programming*, Foreign Literature Publishing House, Moscow (in Russian).
9. Kofman, A. (1982), *Introduction to the theory of fuzzy sets*, Trans. from French, Radio and communication, Moscow, 486 p. (in Russian).
10. Liu, B. (2005), *Theory and practice of undefined programming*, Liu: Trans. from English, BINOM, Moscow, 416 p. (in Russian).
11. Leonenkov, A. V. (2003), *Fuzzy modeling in the environment Matlab and fuzzyTech*, BHW-Petersburg, SPb., 736 p. (in Russian).
12. Raskin, L. and Sira, O. (2008), *Fuzzy mathematics*, monograph, Parus, Kharkiv, 352 p. (in Russian).
13. Raskin, L. and Sira, O. (2020), "Performing arithmetic operations over the (L-R)-type fuzzy numbers", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(4 (105), pp. 6-11, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203590>.
14. Pawlak, Z. (1982), "Rough sets", *International Journal of Information and Computer Sciences*, Vol. 11, No. 5, pp. 341-356.
15. Pawlak, Z. (1991), *Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 284 p.
16. Pawlak, Z. (1997), "Rough Sets approach to knowledge-based decision support", *European Journal of Operational Research*, Vol. 99, No. 1, pp. 48-57.
17. Lev, Raskin, Oksana, Sira (2016), "Fuzzy models of rough mathematics", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, Issue 4, pp. 53-60, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.86739>.

Received (Надійшла) 26.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.05.2021

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 Distributed Information Systems and Cloud Technologies Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: topologyr@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9015-4016>.

Сіра Оксана Володимирівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Oksana Sira – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Distributed Information Systems and Cloud Technologies Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: topologys@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4869-2371>.

Парфенюк Юрій Леонідович – аспірант кафедри розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Yurii Parfeniuk – Postgraduate Student of Distributed Information Systems and Cloud Technologies Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: parfuriy.l@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5357-1868>.

Сухомлин Лариса Вадимівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри менеджменту, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна;
Larysa Sukhomlyn – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Management department, Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine;
 e-mail: lar.sukhomlyn@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9511-5932>.

Структурна оптимізація у багатоканальній розподіленій системі масового обслуговування

Л. Г. Раскін, О. В. Сіра, Ю. Л. Парфенюк, Л. В. Сухомлин

Анотація. Задача структурної оптимізації в розподіленій системі обслуговування вирішена на прикладі системи «виробництво - доставка - споживання» продукту масового попиту. У зв'язку з цим метою роботи є розробка методики структурної оптимізації системи «Виробництво - доставка - масове споживання» шляхом впровадження і раціонального розміщення проміжних точок виробництва на основі рішення задач кластеризації з урахуванням особливостей розрахунку відстаней між міськими об'єктами. Постановка задачі. Для досягнення мети роботи вирішені наступні завдання: кластеризація міських об'єктів по метриці міських кварталів по заданій кількості груп для обраного розташування виробничих і групових центрів; пошук найкращого місця розташування для заданої кількості центрів кластеризації; визначення оптимальної кількості центрів кластеризації. Задача вирішена в три етапи. Перший етап - кластеризація множини об'єктів споживання для заданих місць розташування проміжних центрів доставки. Другий етап - відшукування найкращих місць розташування заданої кількості проміжних центрів доставки. Третій етап - визначення оптимальної кількості проміжних центрів. Сформульована задача вирішується за двома критеріями: сумарна довжина маршрутів доставки продукту споживачам; вірогідність того, що випадковий час доставки перевищить критичне значення. Чисельне значення другого критерію обчислюється за припущенням, що для кожного маршруту можуть бути оцінені значення середнього значення і дисперсії часу доставки. Відповідна кількість виробничих центрів визначається простим порівнянням ефективності системи для декількох реально можливих варіантів. Наведено приклад рішення задачі кластеризації в метриці «міських кварталів» на орієнтованому графі за обома критеріями.

Ключові слова: розподілена система «виробництво – доставка - споживання»; кластеризація; орієнтований граф; найкоротший шлях.

Структурная оптимизация в многоканальной распределенной системе массового обслуживания

Л. Г. Раскин, О. В. Сера, Ю. Л. Парфенюк, Л. В. Сухомлин

Аннотация. Задача структурной оптимизации в распределенной системе обслуживания решена на примере системы «производство – доставка - потребление» продукта массового спроса. В связи с этим целью работы является разработка методики структурной оптимизации системы «Производство - доставка - массовое потребление» путем внедрения и рационального размещения промежуточных точек производства на основе решения задач кластеризации с учетом особенностей расчета расстояний между городскими объектами. Постановка задачи. Для достижения цели работы решены следующие задачи: кластеризация городских объектов по метрике городских кварталов по заданному количеству групп для выбранного расположения производственных и групповых центров; поиск наилучшего местоположения для заданного количества центров кластеризации; определение рационального количества центров кластеризации. Задача решена в три этапа. Первый этап – кластеризация множества объектов потребления для заданных мест расположения промежуточных центров доставки. Второй этап – отыскание наилучших мест расположения заданного числа промежуточных центров доставки. Третий этап – определение рационального числа промежуточных центров. Сформулированная задача решается по двум критериям: суммарная длина маршрутов доставки продукта потребителям; вероятность того, что случайное время доставки превысит критическое значение. Численное значение второго критерия вычисляется в предположении, что для каждого маршрута могут быть оценены значения среднего значения и дисперсии времени доставки. Подходящее количество производственных центров определяется простым сравнением эффективности системы для нескольких реально возможных вариантов. Приведен пример решения задачи кластеризации в метрике «городских кварталов» на ориентированном графе по обоим критериям.

Ключевые слова: распределенная система «производство – доставка - потребление»; кластеризация; ориентированный граф; кратчайший путь.

Information systems research

UDC 004.932

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.12>

Valeriy Barsov, Olena Kosterna, Oleksandr Plakhotnyi

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

RESEARCH OF THE METHOD OF INCREASING THE OBJECT DETERMINATION ACCURACY ON THE LOW-RESOLUTION VIDEO STREAM

Abstract. Study subject. The article proposes and investigates a method for increasing the accuracy of determination of the distance and the obstacle geometric parameters based on object contours determination using a computer vision system that uses low-resolution sensors. **The goal** is the effectiveness evaluation of the proposed method. **Tasks:** to conduct experimental researches of the quality indicators of the method of increasing the object contours determination accuracy; evaluate the effectiveness of this method. **Used methods:** statistical modeling, laboratory scale tests. **The obtained results:** the analysis of the proposed method efficiency was carried out and the influence of this method on the determination accuracy of the distance and object geometric parameters was evaluated. **Conclusions:** the considered method made it possible to achieve the increasing the determination accuracy of the distance and geometric object parameters by compensating for image blur using the Lucy-Richardson deconvolution algorithm. The obtained data showed a decrease in the maximum error in determining the distance from 8% to 4% and the error in the geometric object parameters from 7.7% to 5.8%. The implementation of this approach was carried out in the Python programming language.

Keywords: stereoscopic vision systems; distance determination; geometric parameters determination; monocular vision systems.

Introduction

There are several ways to obtain initial information about the behavior and state of the study objects in modern video monitoring and automated control systems: a multi-sensor approach (stereovision), building an image perspective, the use of fixed cameras and additional object illumination, etc. Each of the presented techniques may well be used in practice, depending on the problem [1, 2].

For the considered problem of the necessary parameters determination, namely the distance to the object and the geometric object parameters, it is necessary to determine the object contours in the image. The accuracy of the object contours determination is directly proportional effect on the determination accuracy of the distance and geometrical object parameters. In turn, the accuracy of contours determining decreases with the distance increasing between the sensor and the object, as the distance increases lost focus sensor and the image becomes blurred, which makes the exact determination circuit [3, 4].

Objective. Effectiveness evaluation of the method for increasing the determination accuracy of the distance and geometric obstacle parameters by using the Lucy-Richardson deconvolution algorithm that can avoid accuracy loss with increasing distance between the sensor and the object.

Image blur level determination

The approach is based on the level determination of the image blur. Since this parameter indicates data loss, namely the loss of accuracy in the object contours determination that causes an error in calculation the distance and geometric obstacle parameters [5-7].

The Laplace kernel is used to determine the level of the image blur, which is represented by the following matrix:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

This approach is used to determine the image boundaries and is a discrete analogue of the Laplace filter.

Since the image is in “2D” format, and for this it is necessary to take the derivative in both dimensions and for this the Laplace operator will be used:

$$Laplace(f) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}.$$

Laplacian extracts image areas that contain fast intensity changes, much like the Sobel and Scharr operators. Like these operators, Laplacian is often used for edge detection. It is assumed that if the image contains a large dispersion, then there is a wide variation of responses as the boundary, and not extreme, representing a normal-focus image. But if there is a very low dispersion, then there will be a small variation of responses, indicating that the image has very small margin. As you know, the more blurry the image, the less margins [8, 9].

To implement this method it is necessary to take the image channel presumably shades of gray and produce convolution using the Laplace kernel presented above, and then obtain the response variance. The obtained dispersion will be used as an estimate of the image blur [10, 11].

In implementing this approach, it was used designed interface, which allowed to carry out measurements on a series of images to determine the level of blur images. In turn, the images were taken at different distances from the object, to obtain the blur level changes depending on the distance to the object changes. Below is a set of measurements from the six images taken at different distances, namely from 0.5 m to 3 m, with a step 0.5 m (Fig. 1).



Fig. 1 Set of images for determining the blur depending on the distance: a – is the distance 0.5 and 1m; b – is the distance 1.5 and 2m; c – is the distance 2.5 and 3m

The Table 1 below shows the dispersion values obtained because of measurements. Below is a plot of the dispersion versus distance (Fig. 2).

Table 1 – Dispersion level measurement results

Distance	0.5	1	1.5	2	2.5	3
Dispersion	1064.46	1105.43	1082.98	816.86	764.70	794.96

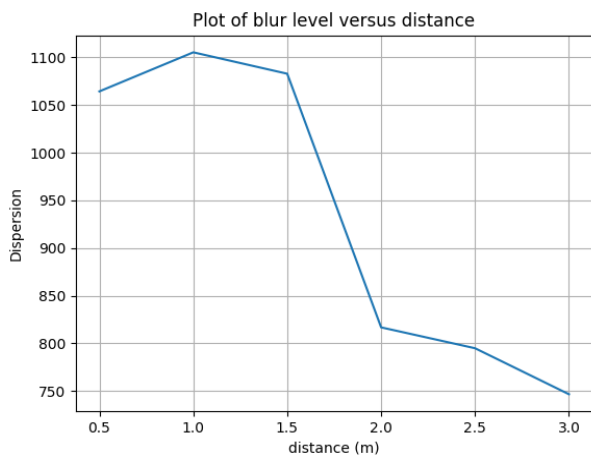


Fig. 2. Graph of dispersion versus distance to the object

As seen from the graph, the least blurry image obtained at a distance of 1m from the sensor. Therefore, this value will be the reference, i.e. all changes from this value will be subject to additional adjustment.

Image Blur Compensation Method

As mentioned above, image blurring changes in proportion to the distance from the sensor to the object. Especially this dependence is manifested on the sensors with low bandwidth. In turn, this affects the subsequent measurements of parameters such as the distance and the geometric object parameters, since the object contour in the image is blurred and becomes not exact.

It is proposed to use the Lucy-Richardson deconvolution algorithm to compensate for image blur.

When an image is created with the optical system and detected, e.g., with photographic film or a charge-coupled device (CCD), it inevitably is blurred, with the ideal point source does not appear as a point, but extends into the so-called point spread function. Extended sources can be decomposed into the sum of many individual point sources, so the observed image can be represented by a transition matrix p , acting on the underlying image:

$$d_i = \sum_j p_{i,j} u_j ,$$

where $p_{i,j}$ is the intensity in a pixel of the underlying image and u_j is the detected intensity in a pixel.

In general, the matrix describes the part of the light from the original pixel j , which is detected in a pixel i . In most good optical systems (or, in general, linear systems that are described as being shear invariant), the transfer function p can be expressed simply by the spatial displacement between the original pixel j and the observation pixel i : $u_j d_i p_{i,j}$:

$$p_{i,j} = P(i - j) ,$$

where $P(\Delta i)$ is called the point spread function.

In this case, the above equation becomes a convolution. It was written for one spatial dimension, but most imaging systems are two-dimensional, with the source, detected image and the point spread function having two indexes.

Thus, the detected two-dimensional image is a convolution of the underlying image with the two-dimensional point spread function $P(\Delta x, \Delta y)$ plus added detection noise.

In order to estimate, given the observable and known $P(\Delta i x, \Delta j y)$, we use the following iterative procedure, in which the estimate which we call for the iteration number t , is updated as follows: $u_j d_i u_j \hat{u}_j^{(t)}$

$$\hat{u}_j^{(t+1)} = \hat{u}_j^{(t)} \sum_i \frac{d_i}{c_i} p_{ij},$$

where $c_i = \sum_j p_{i,j} \hat{u}_j^{(t)}$.

Empirically, it has been shown that if this iteration converges, it converges to a maximum likelihood solution for u_j . Let us write this more generally for two (or more) dimensions in terms of convolution with the point spread function P :

$$\hat{u}_j^{(t+1)} = \hat{u}_j^{(t)} \left(\frac{d}{\hat{u}_j^{(t)} \otimes P} \otimes P \right).$$

Based on this method, a number of measurements were carried out with measurements of the dispersion level before and after applying the method [12]. Below in Fig. 3 shows the results of using this algorithm for the studied image.

Below there are the results of using the algorithm for images at different distances, namely 0.5m to 3m in 0.5m steps. Fig. 4 shows the images numbers at different distances. After processing by the algorithm, the interest areas in the image were highlighted for clarity. As you can see from the object image the blur significantly decreased. Comparison of the algorithm results is presented in the Table. 2.

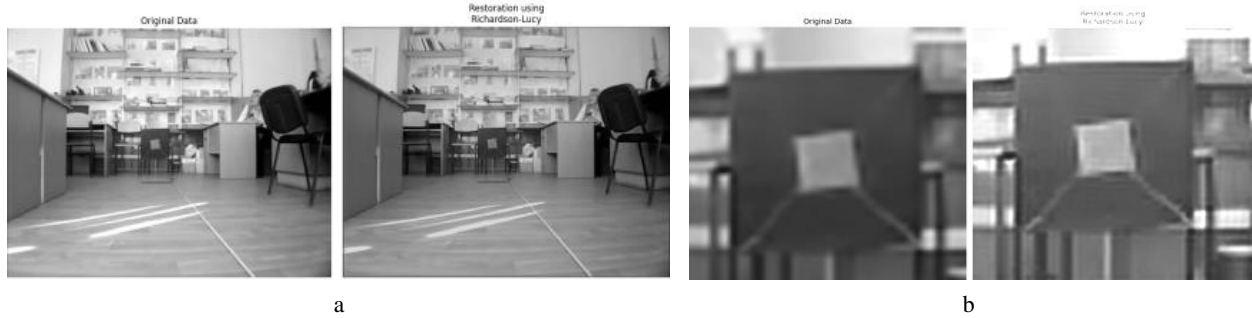


Fig. 3. The result of the Lucy-Richardson algorithm for blur compensation: a – is the original image, b – is the increased area of interest for clarity

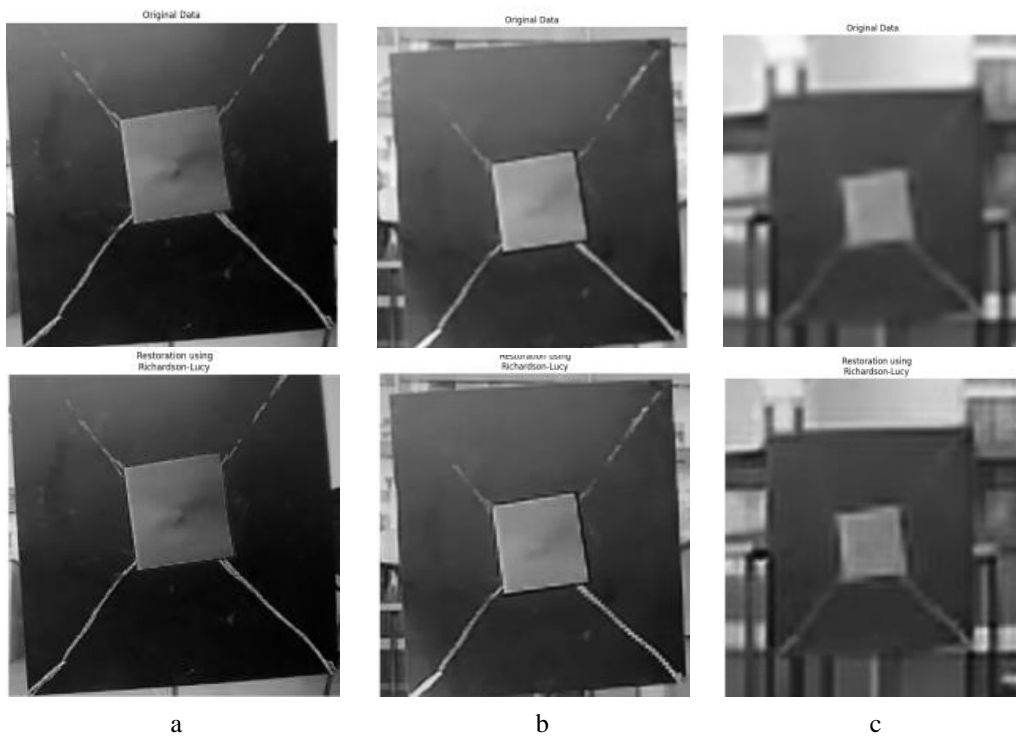


Fig. 4. Images numbers of the algorithm application

Table 2 – Comparison of indications dispersion (blur level) before and after the application of the Lucy-Richardson deconvolution algorithm

Distance	Dispersion level without applying the algorithm	Dispersion level with applying the algorithm
0.5 m	1064.46	3671.48
1.0 m	1105.43	3221.33
1.5 m	1082.98	3600.89
2.0 m	816.86	2853.67
2.5 m	764.70	3254.07
3.0 m	794.96	2859.61

As can be seen from the results obtained and the plot shown in Fig. 5, the dispersion value of the processed images has increased several times. This means that the image clarity is significantly increased which positively affect the further determination of the object contours, of distance calculations and object geometrical parameters.

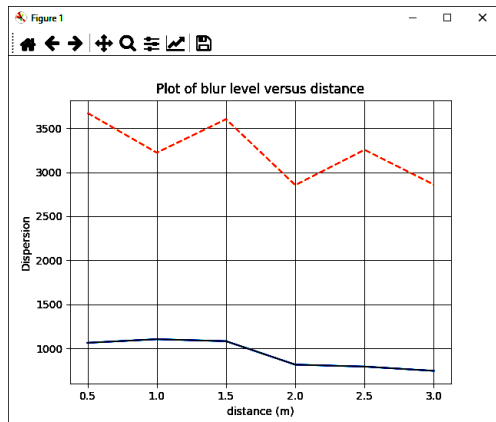


Fig. 5. A plot of the dependence of the blur level on the distance: the solid line represents data of the original image; stroke line represents the processed image

Study of the accuracy determining the distance to the object

To study the effect of this method on the accuracy determining the distance to the object, a number of measurements were carried out.

The first step of this study was to measure the distance without blur compensation in the image. As before, the study is carried out in the laboratory using a black square screen, on which is placed a red square label in size 10 cm [13, 14].

Below is a table and graph of experimental measurements and comparisons with the actual distances (tabl. 3). From the obtained results, it is evident that the peak error in determining the distance was more than 8% at a distance of 2.5 m.

The next stage of the study was to determine the distance of the images with blur compensation. Below in Fig. 7 shows the results of measurements carried out on the image with blur compensation. A complete list of measurements is shown in Table 4.

Using this approach achieved to increase the accuracy of measuring the distance to the object. Comparison of the results is shown in Table 5 and Fig. 8.

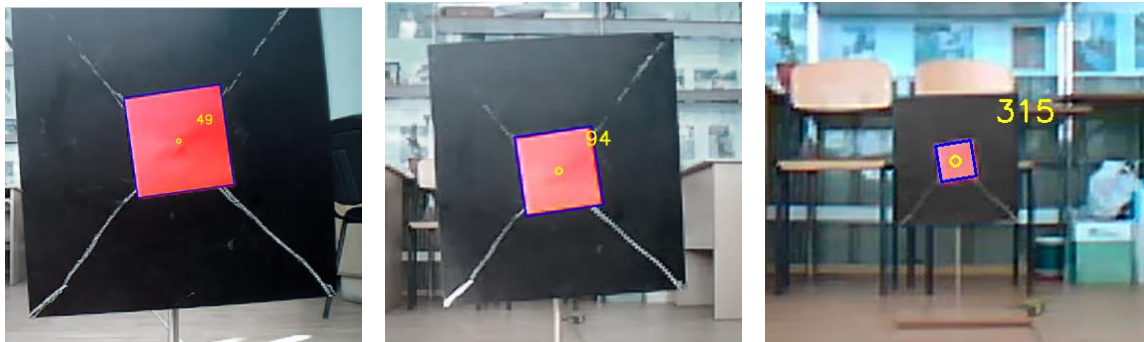


Fig. 6. Experimental measurements without blur compensation

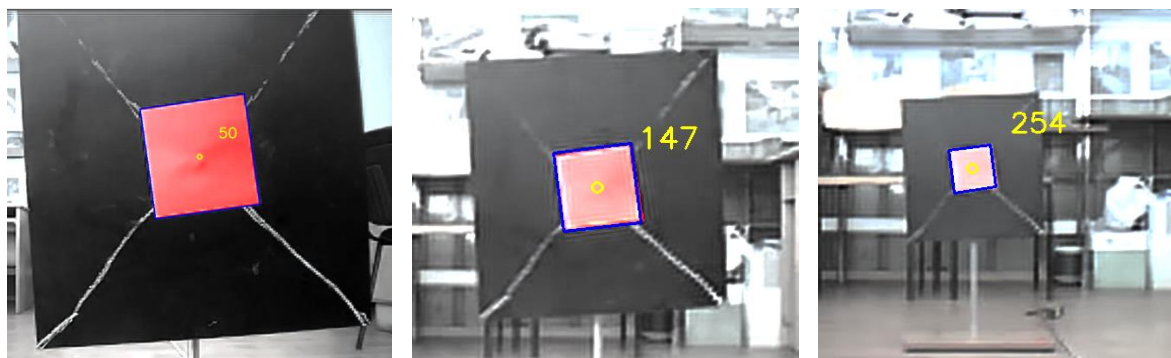


Fig. 7. The measurement results of compensated blurring images

Table 3 – Distance measurement results without blur compensation

Actual distance	50 cm	100 cm	150 cm	200 cm	250 cm	300 cm
Measured distance	49 cm	94 cm	142 cm	210 cm	271 cm	315 cm
Error	2%	6%	5.4%	5%	8%	5%

Table 4 – Measurement results of the distance to compensate blurring

Actual distance	50 cm	100 cm	150 cm	200 cm	250 cm	300 cm
Measured distance	50 cm	96 cm	147 cm	201 cm	254 cm	305 cm
Error	0%	4%	2%	0.5%	1.6%	1.6%

Table 5 – Comparison of the results of measuring the distance to the object

Actual distance	50 cm	100 cm	150 cm	200 cm	250 cm	300 cm
Measured distance (without compensation)	49 cm	94 cm	142 cm	210 cm	271 cm	315 cm
Measured distance (with compensation)	50 cm	96 cm	147 cm	201 cm	254 cm	305 cm

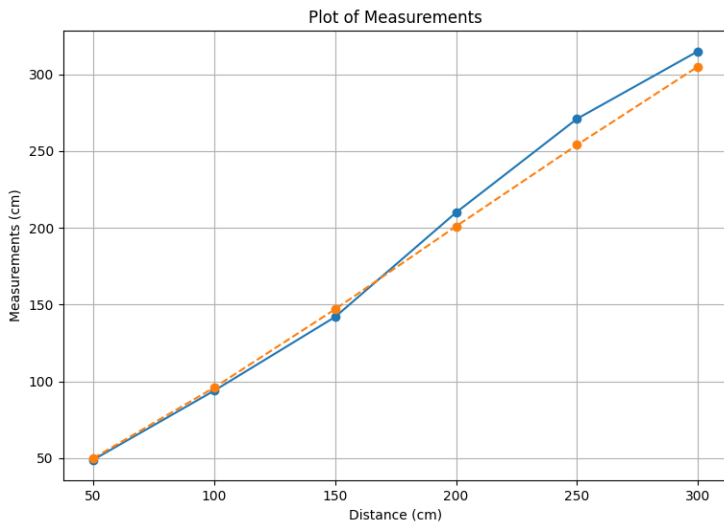


Fig. 8. Graph of comparing the measurement results (the solid line represents a graph of measurements without blur compensation, and a dash line – with blur compensation)

As seen from the obtained results, the increase in accuracy made it possible to reduce the measurement error from a maximum error of 8% before blur compensation, to a maximum error of 4% after compensation.

However, there is a disadvantage of this method, which consists in the fact that for the application of this method it is necessary to use an image reduced to grayscale. To do this, the original image, which has three dimensions, need to be converted to grayscale, which in turn is one-dimensional.

However, the inverse transform to produce is not possible, because we do not know which of the channels belong to values for color restoring.

Thus, there is a problem with color detection, used to determine the object in the frame.

To solve this problem, we used various methods of overlay images, namely, the original image has been

superimposed on the processed image in the «Color Dodge» mode.

In Color Dodge overlay mode the lower layer is divided into an inverted upper layer. This lightens the lower layer depending on the value of the upper layer: the brighter the upper layer, the stronger it affects the color of the lower layer. Mixing of any color with white gives white color, mixing with the black does not change the image. The operation is irreversible due to possible reflections clipping (clipping occurs in the same range as for Linear Dodge.). When the upper layer comprises a uniform color, this effect is equivalent to change the white point on the inverted color. The perceived contrast increases when there is no cut-off.

Thus, it was possible to return the color to the image and not lose sharpness after processing by the method deconvolution Lucy-Richardson. However, the original color of the image has been lost, so the functions to change the brightness and contrast were also used.

Study of the accuracy of determining the geometric object parameters

The next step in analyzing the effectiveness of this approach is to measure the geometric object parameters. The study was carried out by analogy with measuring the distance to the object.

First, the measurements were made of the object sizes at no handles images, i.e. without blur compensation. The obtained measurement parameters are presented below in Table 6 and in Fig. 9.

As seen from the obtained results, the peak error in determining the geometric parameters is 7.7%.

In the next step the measurements of geometric object parameters on images with blur compensation. The results are shown below in Fig. 10 and Table 7.



Fig. 9. Measuring of the geometric object parameters on the image without blur compensation

Table 6 – The results of measuring the geometric object parameters in the image without blur compensation

Distance	50 cm	100 cm	150 cm	200 cm	250 cm	300 cm
Measured distance	10.0 × 10.43	10.6 × 10.94	10.17 × 10.73	9.5 × 9.94	9.2 × 10.46	9.51 × 9.82
Error	2.15%	7.7%	4.5%	0.5%	1.6%	3.35%

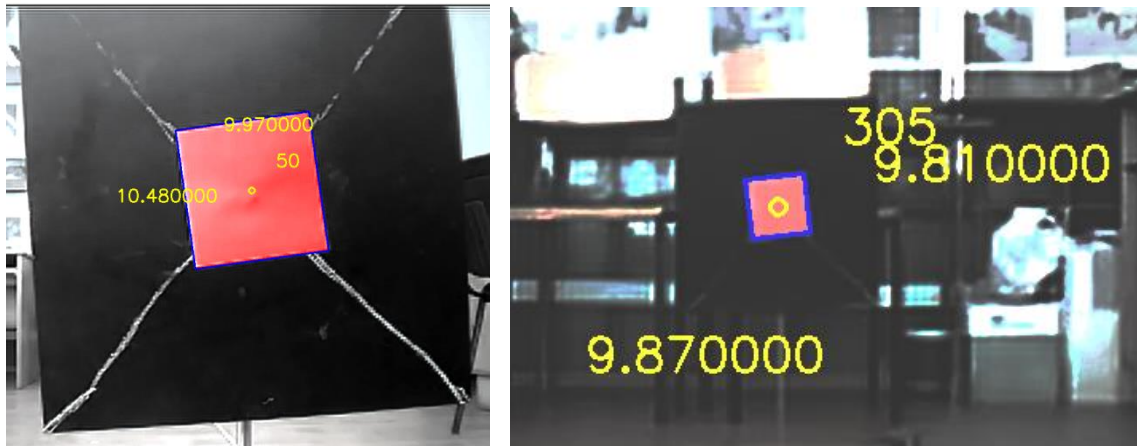


Fig. 10. Measuring the geometric object parameters on the image with blur compensation

Table 7 – Measuring of the geometric object parameters on images with blur compensation

Distance	50 cm	100 cm	150 cm	200 cm	250 cm	300 cm
Measured distance	9.97 × 10.48	10.34 × 10.82	10.19 × 10.83	9.93 × 10.3	9.84 × 10.37	9.81 × 9.87
Error	2.55%	5.8%	5.1%	0.5%	2.65%	1.6%

As can be seen from the obtained results, it shows that the peak error has been reduced to 5.8%. However, in some cases, the error increased, what could affect intermediate image is converted to grayscale and restore images that distort the brightness and contrast, and affect the accuracy of determining the geometric object parameters.

Conclusion

Studies using the deconvolution Lucy-Richardson algorithm to compensate for image blur, provided data that allow a comparative analysis of the parameters for measuring the distance to the object and the geometric object parameters.

The use of the Lucy-Richardson deconvolution algorithm made it possible to halve the peak error in determining the distance from 8% to 4%, and the average error rate was 1.6%. The conducted experiment of measuring the geometric objects parameters to reduce the peak bit error from 7.7% to 5.8%, and the average error was 3.03%.

To record the experimental data through a camera with a resolution of 640x420 pixel for the demonstration this approach most clearly.

In addition, this approach can be used on cameras with higher resolution, such as aerial photographs, which will increase the accuracy of determining the objects size and the height calculation.

REFERENCES

1. Dergachov, K., Krasnov, L., Cheliadin, O. and Plakhotnyi O. (2019), “Web-cameras stereo pairs color correction method and its practical implementation”, *Advanced Information Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 29–42, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.1.06>
2. Barsov, V., Kosterna, O. and Plakhotnyi O. (2020), “Research of the methods efficiency for determining the distance and geometric objects parameters of technical vision systems”, *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 4, pp. 63-69, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.09>
3. Barsov, V. and Plakhotnyi O. (2018), “Determining the distance to the object and its geometric parameters for navigating the robot”, *Control, navigation and communication systems*, No. 4 (50), pp. 3–7, DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.4.003>
4. Bansal, Raghav, Raj, Gaurav and Choudhury, Tanupriya (2016), Blur image detection using Laplacian operator and Open-CV, *IEEE Xplore*, pp. 63-67, DOI: <https://doi.org/10.1109/SYSMART.2016.7894491>.
5. Panfilova, K. and Umnyashkin, S. (2016), “Linear blur compensation in digital images using Lucy-Richardson method”, *IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW)*, pp. 302-304.
6. Herbert, Bay and Andreas, Ess, (2008), “TinneTuytelaars, Luc Van Gool “SURF: Speeded Up Robust Features”, *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)*, Vol. 110, No. 3, pp. 346–359.
7. (2020), Deblurring Images Using the Lucy-Richardson Algorithm Homepage, available at: <https://www.mathworks.com/help/images/deblurring-images-using-the-lucy-richardson-algorithm.html>.
8. (2020), Camera Calibration in the program Camera Calibration Toolbox for Matlab, Homepage, available at: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/, last accessed 2020/04/05.

9. Joseph. Howse and Joe, Minichino (2015), *Learning OpenCV 3 Computer Vision with Python*, Second Edition, September 2015, Packt Publishing, ISBN: 9781785289774.
10. Saurabh, Kapur (2017), *Computer Vision with Python 3*, Packt Publishing, August, ISBN: 978-1-78829-976-3.
11. Prateek, Joshi (2015), *OpenCV with Python By Example*, Packt Publishing, September, ISBN: 978-1-78528-393-2.
12. (2020), Library for developing interfaces in Python, URL: <https://doc.qt.io/qtforpython/>
13. Lucy, L.B. (1974), "An iterative technique for the rectification of observed distributions", *The Astronomical journal*, vol. 79, No. 6.
14. Richardson, W.H. (1972), "Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration", *Journal of the optical society of America*, vol. 62, No. 6, pp. 55–59.

Надійшла (received) 25.02.2021

Прийнята до друку (accepted for publication) 27.04.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Барсов Валерій Ігорович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет імені М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна;

Valeriy Barsov – Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Aerospace Radio-Electronic Systems Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: v.i.barsov@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9029-4633>.

Костерна Олена Юрївна – аспірантка, асистентка кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет імені М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна;

Olena Kosterna – postgraduate student, Assistant of the Aerospace Radio-Electronic Systems Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: lenchik31pka19@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7546-1616>.

Плахотний Олександр Вікторович – аспірант, асистент кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет імені М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна;

Oleksandr Plakhotnyi – postgraduate student, Assistant of the Aerospace Radio-Electronic Systems Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: plakhotnyi@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6406-8501>.

Дослідження методу підвищення точності визначення об'єкта на відеопотоці низької роздільної здатності

В. І. Барсов, О. Ю. Костерна, О. В. Плахотний

Анотація. Предмет вивчення. У статті пропонується і досліджується метод підвищення точності визначення відстані і геометричних параметрів перешкоди на основі визначення контурів об'єкта за допомогою системи технічного зору з використанням датчиків низькою роздільною здатністю. Метою є оцінка ефективності запропонованого методу. **Завдання:** провести експериментальні дослідження, показників якості методу підвищення точності визначення контурів об'єкта; оцінити ефективність роботи даного методу. **Використовувані методи:** статистичне моделювання, лабораторні натурні випробування. **Отримані результати:** проведено аналіз ефективності роботи запропонованого методу і оцінено вплив даного методу на точність визначення відстані і геометричних параметрів об'єкта. **Висновки:** Розглянутий метод дозволив отримати підвищення точності визначення відстані і геометричних параметрів об'єкта шляхом компенсації розмиття зображення, за допомогою алгоритму деконвуляції Люсі-Річардсона. Отримані дані показали зниження максимальної помилки визначення відстані з 8 до 4% і помилки геометричних параметрів об'єкта з 7,7 до 5,8%. Реалізація даного підходу виконувалася на мові програмування Python.

Ключові слова: стереоскопічні системи технічного зору; визначення відстані; визначення геометричних параметрів; бінокулярні системи технічного зору.

Исследование метода повышения точности определения объекта на видеопотоке низкого разрешения

В. И. Барсов, Е. Ю. Костерная, А. В. Плахотный

Аннотация. Предмет изучения. В статье предлагается и исследуется метод повышения точности определения расстояния и геометрических параметров препятствия на основе определения контуров объекта с помощью системы технического зрения использующей датчики низкого разрешения. **Целью** является оценка эффективности предлагаемого метода. **Задачи:** провести экспериментальные исследования, показателей качества метода повышения точности определения контуров объекта; оценить эффективность работы данного метода. **Используемые методы:** статистическое моделирование, лабораторные натурные испытания. **Полученные результаты:** проведен анализ эффективности работы предлагаемого метода и оценено влияние данного метода на точность определения расстояния и геометрических параметров объекта. **Выводы.** Рассмотренный метод позволил добиться повышения точности определения расстояния и геометрических параметров объекта путем компенсации размытия изображения, с помощью алгоритма деконвуляции Люси-Ричардсона. Полученные данные показали снижение максимальной ошибки определения расстояния с 8 до 4% и ошибки геометрических параметров объекта с 7,7 до 5,8%. Реализация данного подхода выполнялась на языке программирования Python.

Ключевые слова: стереоскопические системы технического зрения; определения расстояния; определение геометрических параметров; монокулярные системы технического зрения.

Vitalii Bezdielnyi, Serhii Shevchenko, Illia Hridasov

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE LEVEL OF INCIPIENT TURBULENCE IN THE WORKING PART OF THE T-1 WIND TUNNEL OF IVAN KOZHEDUB KHARKIV NATIONAL AIR FORCE UNIVERSITY

Abstract. The **subject** of the article is to determine the level of incipient turbulence in the wind tunnel T-1 which is based on the method of measuring the pressure drop. The **purpose** is to experimentally determine the level of incipient turbulence in the working part of wind tunnel T-1 of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University in preparation for aerodynamic testing of aircraft models. **Research methods:** the method of pressure drop on the surface of the sphere by drainage. The following **results** of experimental determination of the level of incipient turbulence in the wind tunnel T-1 were obtained. It is established that the wind tunnel T-1 has a level of incipient turbulence 0,5...0,9 %, which corresponds to the normal condition for further experimental studies. **Conclusions.** According to the results of studies of the incipient turbulence in the wind tunnel T-1 by the method of pressure drop, the main dependences are obtained, and the incipient turbulence of the flow for the wooden sphere $\xi = 0,9$ %, and for the metal sphere $\xi = 0,5$ %, is determined. Determining the pressure distribution and aerodynamic drag does not involve measures to balance the aerodynamic scales and their certification, which determines the necessary role in the obtained reliable results of the experimental study, and this favors the drainage method.

Keywords: incipient turbulence; wind tunnel; pressure drop; aerodynamic scales; experimental study; drainage method.

Introduction

A numerical aerodynamic experiment allows to investigate the general structure of flow and certain features of flow within the limits of certain models of gas at the change of parameters of research object. A numerical experiment takes advantage before a physical experiment and flying tests in an economy, especially at research of plenty of variants and change of different parameters, descriptions and terms. Thus periodically comparisons of results of numerical experiments must be made with data correctly done physical experiments. In case of unsatisfactory concordance of results the detailed research of divergences that arose up is executed [1]. Thus, experimental aerodynamics is the important constituent of verification of aerodynamics theoretical.

As is known, the results of experimental verifications of models in wind tunnels do not depend on this field experiment. This is to stream the models in the conditions to be created in the aerodynamic laboratory, and in kind are not similar. In order to obtain other characteristics, judging by other characteristics, it is necessary to know the laws of transition from models to nature [2].

Experimental installations and wind tunnels allow to determine aerodynamic characteristics with high accuracy and a wide range of measurement of parameters. A large number of works are devoted to the experimental study of the structure of gas flow in a model experiment [1-6].

The main factors that quantitatively affect the test results are the criteria for the perfection of the wind tunnel. [5]. When setting up any experiment, it is necessary to create the conditions under which it is possible to carry out an experiment that provides practical use of the results. A necessary condition for conducting an aerodynamic experiment is compliance not only with the criteria of geometric perfection, but also the equality

of Reynolds, Mach, Struhal numbers and the degree of flow turbulence for the model under study [6].

The aim of the article is to experimentally determine the level of incipient turbulence in the working part of wind tunnel T-1 of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University in preparation for aerodynamic tests of aircraft models.

Main part

In the study of the flow of a viscous flow of bodies of various shapes, crisis phenomena are observed, which are associated with a sharp change in the nature of this flow. These phenomena are accompanied by the separation of the flow from the surface or occur with continuous flow [1].

A flat plate, which flows around the flow directed along it, is a standard for flow without separation of the boundary layer. [2]. With continuous flow around the plate, the crisis phenomenon consists of a sharp increase in resistance, due to the transition from the laminar boundary layer to the turbulent. The flow around the sphere will have a completely different character: due to the increase in the surface of the sphere boundary layer and inhibition, which is due to changes in pressure, there is a separation of this layer. The beginning of this separation coincides with the point on the surface where $\tau_{cm} = 0$. Defined as:

$$\mu_{cm} (\partial V_x / \partial y)_{y=0} = 0, \quad (1)$$

The separation of the boundary layer occurs downstream, where there is more friction stress on the walls, because in this case the fluid particles will travel a longer distance in the boundary layer along the surface of the body before τ_{cm} will be equal to zero. Thus, in the case of a laminar boundary layer, the separation will occur much higher downstream than in the case of a mixed boundary layer, when there is a turbulent bound-

ary layer at the stern of the sphere. Scheme of flow separation during flow around the sphere by laminar flow (subcritical flow) is presented on Fig. 1. Scheme of flow separation at the flow around the sphere with mixed flow, supercritical flow is presented on Fig. 2. Distribution of pressure coefficients for the surface sphere is presented on Fig. 3.

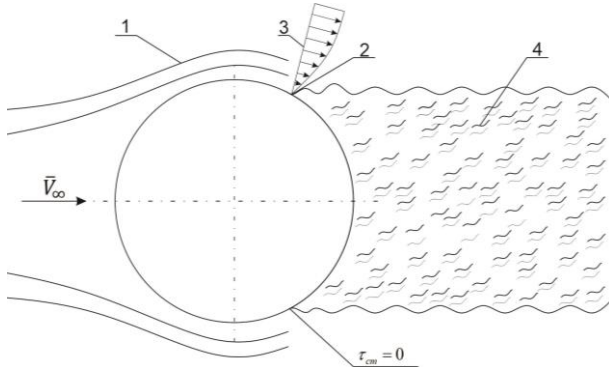


Fig. 1. The scheme of separation of a stream at a stream flow around a sphere by a laminar current: 1- current lines; 2 – the point of separation of the boundary layer; 3- plot of velocities at the breakpoint; 4 – vortex trace of the body

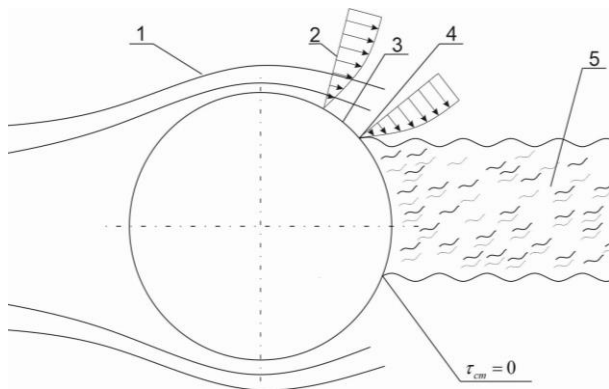


Fig. 2. Flow separation scheme with mixed flow: 1- current lines; 2 – plot of velocities in the boundary layer; 3 – the point of transition of the laminar boundary layer to turbulent; 4 – the point of separation of the boundary layer and the plot of velocities at the point of separation; 5 – vortex trace of the body

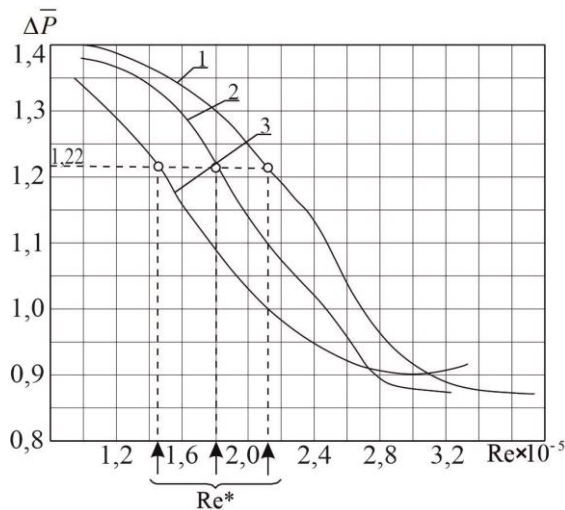


Fig. 3. Distribution of pressure coefficients on the surface of the sphere: 1- vortex-free flow with an ideal flow; 2 – subcritical flow; 3 – supercritical flow

The lower the flow separates the boundary layer, the greater the nature of the flow of the layer through the flow of viscous fluid to flow around the ideal medium. Therefore, despite the fact that the frictional resistance during the transition from the laminar boundary layer to the turbulent layer increases, the flow crisis leads to a decrease in the total value of the layer resistance due to the region of reduced pressure in the stern (Fig. 2). Crisis phenomena in the case of flow around the sphere, other things being equal, occur the faster (ie with a smaller Reynolds number), the greater the incipient turbulence of the flow. The sphere, due to the high sensitivity of the nature of its flow to the incipient turbulence, is used in experimental aerodynamics as a reference sample of the flow surface in determining the magnitude of this turbulence [1].

To determine the incipient turbulence of the flow in the working part of the wind tunnel T-1, an experimental method based on measuring the pressure drop on the surface of the sphere was used. The Reynolds number has the strongest effect on the pressure distribution in the aft part of the sphere. If before the onset of the "crisis" the sphere is dominated by rarefaction, then with the "crisis" flow in this area there is more pressure. The region that is most responsive to changes in the Reynolds number is determined by the polar coordinates $\theta = 150^\circ \div 210^\circ$ (Fig. 2). This feature of the flow around the sphere is used to determine the critical Reynolds number by the pressure drop in the main and aft parts of the sphere [1].

In the body of the sphere were made drainage holes, one of them at a critical point, and the other in the stern, at a point with coordinates $\theta = 157^\circ 30'$. To increase the accuracy of the experiment, the holes are symmetrically placed (Fig. 4), the measured pressure was averaged using an integrated adapter and marked p_K .

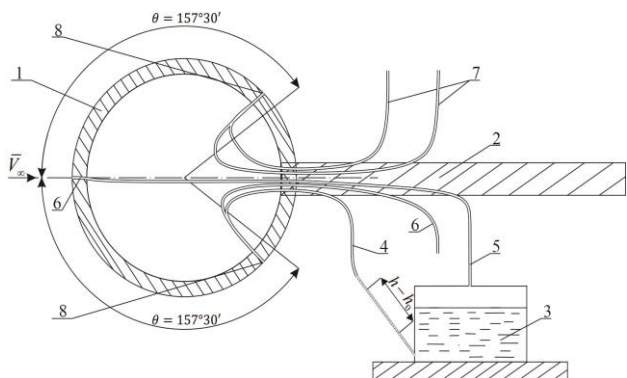


Fig. 4. Sphere model for determining the incipient flow turbulence by the surface pressure drop method: 1 – sphere; 2 – mounting sphere; 3 – liquid micromanometer; 4, 5, 6, 7 – air routes connecting drainage points with a micromanometer, 8 – drainage holes for measuring pressure

Changing the Reynolds number will significantly affect the pressure drop $\Delta \bar{p} = p_0 - p_K$ at these points and at the critical point. If you change the flow rate in the wind tunnel, measure the pressure drop, you can build a dependence on the Reynolds number (Re) to the pressure drop:

$$\Delta \bar{p} = \frac{2p_0 - p_k}{\rho_\infty V_\infty^2} = \frac{2\Delta p}{\rho_\infty V_\infty^2} = f(\text{Re}), \quad (2)$$

Value $\Delta \bar{p} = 1,22$ corresponds to the coefficient of drag at which the critical Reynolds number is determined. Thus, the dependence can be used to find this Reynolds number $\Delta \bar{p} = f(\text{Re})$, on which the value of Re is the value $\Delta \bar{p} = 1,22$ [1].

Sphere with air drainage routes in the working part of the wind tunnel T-1 is presented on Fig. 5.

Drained sphere with a diameter $D = 13,7\text{cm}$, mid-section area $S_{mid} = 0,0147\text{m}^2$ mounted on the fairing mounting in the working part of the wind tunnel T-1.

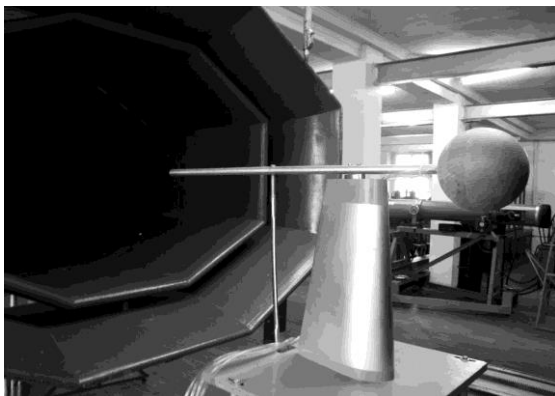


Fig. 5. Drained wooden sphere in the working part of the subsonic wind tunnel T-1

Before starting the wind tunnel, the barometric pressure was measured, and the incipient readings of the micromanometer were taken at the same time. Air density was defined as:

$$\rho_\infty = \rho_{MCA} \frac{p}{p_{MCA}} \frac{273 + t_{MCA}}{273 + t}, \quad (3)$$

ρ_{MCA} , p_{MCA} , t_{MCA} – respectively density, pressure and air temperature in standard atmospheric conditions.

The coefficient of dynamic viscosity of air is defined as:

$$\mu_\infty = \mu_0 (t_{MCA}/t_0), \quad (4)$$

$\mu_0 = 1,71 \cdot 10^{-6} \text{kg} \cdot \text{cek} / \text{m}^2$; t_0 – measured temperature. The kinematic viscosity coefficient is defined as:

$$\nu_\infty = \mu_\infty / \rho_\infty. \quad (5)$$

The flow rate in the working part of the viscosity wind tunnel is defined as:

$$V_\infty = \sqrt{\frac{2}{\rho_\infty} (h - h_0) \sin \beta \cdot \gamma \cdot \xi_T}, \quad (6)$$

$\gamma = 0,8 \text{kg} / \text{dm}^3$ – the specific gravity of the liquid in the micromanometer; $\beta = 30^\circ$ – the angle of inclination of the plane of the measuring tube of the micromanometer; ξ_T – the coefficient of calibration of the nozzle of full pressure (its value is taken equal to one).

The velocity pressure of the incident flow:

$$q_\infty = \rho_\infty V_\infty^2 / 2. \quad (7)$$

The Reynolds number is defined as:

$$\text{Re} = V_\infty D / \nu_\infty. \quad (8)$$

The speed of the oncoming flow V_∞ was determined using a full pressure tube and the braking pressure, which was measured at the frontal point of the sphere. The pressure drop was measured at points of the root part of the sphere using a micromanometer.

The pressure drop is defined as:

$$\Delta p = p_0 - p_k = (h - h_0) \sin \beta \cdot \gamma \cdot \xi_T. \quad (9)$$

The corresponding dimensionless quantity:

$$\Delta \bar{p} = \Delta p / q_\infty. \quad (10)$$

Similarly, for the five modes of operation of the wind tunnel T-1 definitions are presented in table 1.

Table 1. Data on the pressure drop on the surface of a wooden sphere in wind tunnel T-1

$V_\infty, \text{m/c}$	13,5	18	25	30	34	38
$q_\infty, \text{kg} / \text{m}^2$	11,2	20,0	38,7	55,8	71,6	89,5
$\text{Re} \cdot 10^{-5}$	1,32	1,78	2,45	2,94	3,34	3,73
h, mm	40	70	110	125	145	185
$\Delta h, \text{mm}$	40	70	110	125	145	185
Pressure drop, Δp	16	28	44	50	58	74
Pressure drop, $\Delta \bar{p}$	1,41	1,39	1,13	0,89	0,8	0,82

According to the experiment, the dependence is constructed $\Delta \bar{p} = f(\text{Re})$, according to which the critical Reynolds number is determined $\text{Re}^* = 2,3 \cdot 10^{-5}$, that corresponds $\Delta \bar{p} = 1,22$ and presented on Fig. 6.

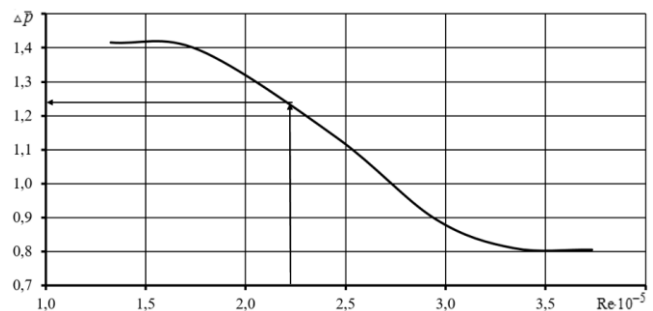


Fig. 6. Determination of the critical number Reynolds as a result of the experiment with a wooden sphere

The level of incipient turbulence is defined as:

$$\xi = \sqrt{\frac{1}{t} \int_{t_1}^{t_2} \Delta V^2 dt} / \left(\frac{1}{t} \int_{t_1}^{t_2} V dt \right) \quad (11)$$

According to the Reynolds number found $\text{Re}^* = 2,3 \cdot 10^{-5}$, using dependencies $\xi = f(\text{Re})$ [1], determined the incipient turbulence of the flow in the working part of the wind tunnel of Ivan Kozhedub Kharkiv Air Force University $\xi = 0,9\%$ (Fig. 7, 9).

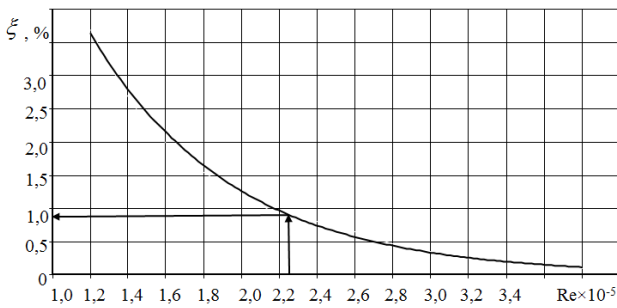


Fig. 7. Dependence of the critical number Reynolds from the incipient flow turbulence for a wooden sphere

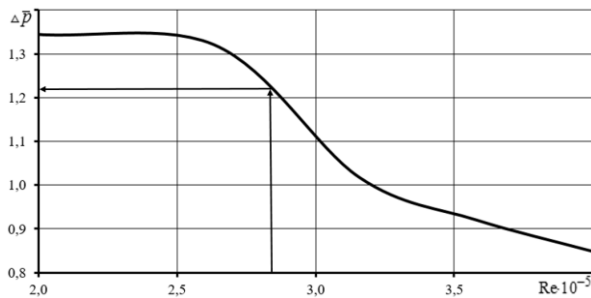


Fig. 8. Determination of the critical number Reynolds as a result of the experiment with a metal sphere

The incipient turbulence was also determined for the metal sphere is presented on Fig. 9.



Fig. 9. Drained metal sphere in the working part of the subsonic wind tunnel T-1

For the five modes of operation of the wind tunnel T-1 determination $\Delta \bar{p}$ definitions are presented in table 2. According to the Reynolds number found $Re^* = 2,7 \cdot 10^{-5}$, using dependencies $\xi = f(Re)$ [1], determined the incipient turbulence of the flow in the

working part of the wind tunnel of Ivan Kozhedub Kharkiv Air Force University $\xi = 0,5\%$ (Fig. 10).

Table 2. Data on the pressure drop on the surface of the metal sphere in wind tunnel T-1

$V_\infty, m/c$	13,5	18	25	30	34	38
$q_\infty, \kappa\Gamma/m^2$	11,2	20,0	38,7	55,8	71,6	89,5
$Re \cdot 10^{-5}$	1,42	1,89	2,63	3,15	3,57	4
h, mm	43	68	128	142	165	190
$\Delta h, mm$	43	68	128	142	165	190
Pressure drop, Δp	17,2	27,2	51,2	56,8	66	76
Pressure drop, $\Delta \bar{p}$	1,52	1,35	1,32	1,01	0,92	0,84

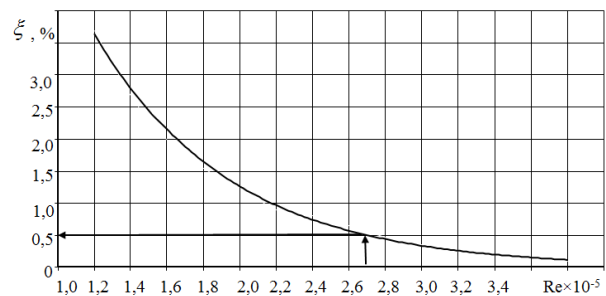


Fig. 10. Dependence of the critical number Reynolds from the incipient flow turbulence for the metal sphere

Conclusions

According to the results of studies of the incipient turbulence in the wind tunnel T-1 by the method of pressure drop, the main dependences are obtained, and the incipient turbulence of the flow for the wooden sphere $\xi = 0,9\%$, and for the metal sphere $\xi = 0,5\%$, is determined.

Determining the pressure distribution and total aerodynamic drag does not involve measures to balance the aerodynamic scales and their certification, which plays an important role in obtaining reliable results of the experimental study, and is an advantage of the drainage method.

According to the determined incipient turbulence, the turbulence factor is determined, which will allow to compare the results of tests in wind tunnels T-1 with the results of tests in other wind tunnels [7-13]. According to the results of the experimental study, it was found that the wind tunnel T-1 meets the normal conditions for further experimental studies of unmanned aerial vehicles with hybrid engines.

REFERENCES

1. Krasnov, N. F., Koshevoy, V. N., Danilov, A. N., Zakharchenko, V. F., Borovsky, E. E. and Khlupnov, A. I. (1974), *Applied aerodynamics*, Higher school, Moscow, 732 p.
2. Martynov, A. K. (1958), *Experimental aerodynamics*, State publishing house of the defense industry, Moscow, 348 p.
3. Chmovzh, V. V., Surgailo, M. L. and Solyanik P. N. (2006), *Experimental aerodynamics*, NAU "KhAI", Kharkiv, 105 p.
4. Lyubimov, A. N., Tyumnev, N. M. and Hoot G. I. (1995), *Methods of research of gas flows and determination of aerodynamic characteristics of axisymmetric bodies*, Nauka, Moscow, 397 p.
5. Gorshenin, D. S., Martynov, A. K. (1977), *Methods and tasks of practical aerodynamics*, Mashinostroenie, Moscow, 240 p.
6. Anipko, O. B., Gazeav, V. V., Dzhimiev, A. R., Spirkin, E. V., Ukrainets, Ye. O. and Shabrat, I. I. (2009), "Experimental determination of the values of the perfection criteria for the T-1 wind tunnel of the Kharkov Air Force University", *Aerohydrodynamics and Aeroacoustics: Problems and Prospects*, NAU "KhAI", Kharkiv, No. 3, pp. 28-32.

7. Ukrainets, Ye. O., Glushchenko, P. A. and Spirkin, E. V. (2018), "Determination of values of criteria of perfection of an aerodynamic pipe at technical preparation of an aerodynamic experiment", Weapons systems and military equipment, No. 3 (55), pp. 100-107, DOI: <https://doi.org/10.30748/soivt.2018.55.14>.
8. Dubov, B. S., Radzig, A. N., Semenchikov, N. V. and Yakovlevsky, O. V. (2004), *Certification support of aerodynamic tests*, textbook. Manual, MAI, Moscow, 84 p.
9. Radzig, A. N. and Semenchikov, N. V. (1992), *Model experiment in wind tunnels*, MAI, Moscow, 65 p.
10. Marqués, P. and Da Ronch, A. (2017), *Advanced Uav Aerodynamics, Flight Stability and Control: Novel Concepts, Theory and Applications*, John Wiley & Sons: Southport, UK.
11. Discetti, S., and Ianiro, A. (2017), *Experimental Aerodynamics*, CRC Press, Boca Raton, 468 p.
12. Dryden, H. L. and Kuethe, A. M. (1923), *Effect of turbulence in wind-tunnel measurements*, NACA Report, No. 342, 32 p.
13. Tropea, C., Yarin A.L. and Foss, J.F. (2007), *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*, Springer, Berlin, 1569 p.

Надійшла (received) 21.01.2021

Прийнята до друку (accepted for publication) 20.04.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Бездельний Віталій Вадимович – ад'юнкт, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Vitalii Bezdelynyi – Doctoral Student, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: dr.bezdelniy22@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9706-4021>.

Шевченко Сергій Олександрович – викладач, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Serhii Shevchenko – Instructor, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: memosvit@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9000-5352>.

Гридасов Ілля Олександрович – начальник курсу, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Iliia Hridasov – Company commander, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: gridasovillya91@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4886-4468>.

Експериментальне визначення рівня початкової турбулентності в робочій частині аеродинамічної труби Т-1 Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

В. В. Бездельний, С. О. Шевченко, І. О. Гридасов

Анотація. Предметом статті є визначення рівня початкової турбулентності потоку в аеродинамічній трубі Т-1, що базується на методі вимірювання перепаду тиску. **Метою** статті є експериментальне визначення рівня початкової турбулентності в робочій частині аеродинамічної труби Т-1 Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба при підготовці до аеродинамічних випробувань зразків літальних апаратів. **Методи дослідження:** метод перепаду тиску на поверхні сфери шляхом дренажу. **Отримані наступні результати** експериментального визначення рівня початкової турбулентності в аеродинамічній трубі Т-1. Встановлено, що аеродинамічна труба Т-1 має рівень початкової турбулентності 0,5...0,9 %, що відповідає нормальним умовам для подальших експериментальних досліджень. **Висновки.** За результатами досліджень початкової турбулентності в аеродинамічній трубі Т-1 методом перепаду тиску отримано основні залежності перепаду тиску від числа Рейнольдса. Встановлено, що початкова турбулентність потоку для дерев'яної сфери $\xi = 0,9$ %, для металеві сфери $\xi = 0,5$ %. Визначення розподілу тиску та повного аеродинамічного опору не передбачає проведення заходів балансування аеродинамічних вагів та їх сертифікації, що грає важливу роль в отриманні достовірних результатів проведення експериментального дослідження, та є перевагою дренажного методу.

Ключові слова: початкова турбулентність; аеродинамічна труба; експериментальний метод; перепад тиску; експериментальне дослідження.

Экспериментальное определение уровня начальной турбулентности в рабочей части аэродинамической трубы Т-1 Харьковского национального университета Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба

В. В. Бездельный, С. А. Шевченко, И. А. Гридасов

Аннотация. Предметом статьи является определение уровня начальной турбулентности потока в аэродинамической трубе Т-1, базирующейся на методе измерения перепада давления. **Целью** статьи является экспериментальное определение уровня начальной турбулентности в рабочей части аэродинамической трубы Т-1 Харьковского национального университета Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба при подготовке к аэродинамическим испытаниям образцов летательных аппаратов. **Методы исследования:** метод перепада давления на поверхности сферы путем дренажа. **Получены следующие результаты** экспериментального определения уровня начальной турбулентности в аэродинамической трубе Т-1. Установлено, что аэродинамическая труба Т-1 имеет уровень начальной турбулентности 0,5...0,9 %, что соответствует нормальным условиям для дальнейших экспериментальных исследований. **Выводы.** По результатам исследований начальной турбулентности в аэродинамической трубе Т-1 методом перепада давления получены основные зависимости перепада давления от числа Рейнольдса. Установлено, что начальная турбулентность потока для деревянной сферы $\xi = 0,9$ %, для металлической сферы $\xi = 0,5$ %. Определение распределения давления и полного аэродинамического сопротивления не предусматривает проведения мероприятий балансировки аэродинамических весов и их сертификации, что играет важную роль в получении достоверных результатов проведения экспериментального исследования и является преимуществом дренажного метода.

Ключевые слова: начальная турбулентность; аэродинамическая труба; экспериментальный метод; перепад давления; экспериментальное исследование.

Olha Zinchenko¹, Viktor Vyshnivskiy¹, Yuliia Berezovska¹, Peter Sedlaček²

¹ State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine

² University of Žilina, Žilina, Slovakia

EFFICIENCY OF COMPUTER NETWORKS WITH SDN IN THE CONDITIONS OF INCOMPLETE INFORMATION ON RELIABILITY

Abstract. The paper analyzes the effectiveness of computer networks with SDN in conditions of incomplete reliability information. In order to ensure the specified indicators of the reliability of the computer network, it is recommended to use their guaranteed estimates. To increase the level of security of information systems and introduce the concept of time reserve in the process of packet transmission, it is necessary to separate the functions of traffic transmission from management functions. This is the basic principle of SDN. When using SDN technology in computer networks, it is possible to enter a time reserve when transmitting messages. This makes it possible to more accurately determine the reliability. The evaluation of the data transmission system of the computer network takes into account the possibility of entering a time reserve and obtained the basic calculated ratios for reliability indicators in terms of incomplete information about their distribution laws. A priori information is limited by knowledge of the first initial moments of mathematical expectation and variance. These results are a justification for the structure of computer networks that are designed or upgraded. You can also use this information to build highly reliable networks or technical facilities that exist in a single implementation.

Keywords: information system; functional stability; software-defined networking; network; data transfer; limited a priori information; security performance.

Introduction

The operation of computer networks (CN), designed to automate management, is in constant interaction with external influences. Information conflicts that occur as a result of such interaction cause the destruction of information resources, disruption of regular information processes, and as a consequence of the failure of system and application functions. All this determines the presence of mechanisms in the CN, which should ensure their reliability.

A difficult scientific and practical task at present is the assessment of reliability indicators needed to compare different design options. An even more difficult task is to find the best option that achieves optimal reliability with certain limitations [11].

Modern CMs require the implementation of management tools using protocols that do not depend on services and, in turn, are provided by different operators and / or pro-providers throughout the network, regardless of the types of technical systems used in it. Creating systems that are a priori focused on working in conditions of incomplete or fuzzy output, uncertainty of external fluctuations and the working environment, requires the use of innovative approaches to management using new methods and technologies. It is obvious that in the presence of different types of uncertainty, a high level of autonomy, adaptability and reliability of CN should be ensured by increasing their capabilities based on the processing of special information. One of the main selection criteria should be the required quality of operation of the control system in conditions of uncertainty with the random nature of external fluctuations, which include unforeseen changes in their own performance, environmental parameters, goals and more.

The efficiency of the CN is largely determined by time delays in data transmission between network users. Minimization of delay in CN with homogeneous traffic is provided at the design stage using mathematical

models of mass service with a homogeneous flow of applications.

Currently, multiservice networks are becoming widespread, the characteristic feature of which is the heterogeneity of traffic [1, 2]. Heterogeneity of traffic is the transmission of information network packets of several types (video and audio packages, full packets, text packets, etc.), which are subject to different requirements [3]. These requirements will be formulated in the form of restrictions on the delivery time of packages of different types. In this case, the restrictions can be of two types: probabilistic in the form of the allowable probability of exceeding the established time delay limits of packets in the information network and average in the form of a limit on the average delay time. This limit can be taken into account through the use of special traffic management methods. Solving this problem requires the use of models with a heterogeneous flow of applications that allow you to analyze the properties of priority data transmission systems and formulate recommendations for the design of priority networks.

Therefore, to ensure the reliability of the CN, it is proposed to use software-configured networks (SDN) [4, 5]. When using software-configured networks (SDN), it is possible to introduce the concept of time reserve into the packet transmission process. That is, the system redirects a packet that was not transmitted on another trajectory. However, if the delivery time of this packet does not exceed the allowable delay time, it will be considered that the communication channel failed.

The role of reliability indicators, which are interpreted as characteristics of probabilistic mathematical models of objects, is performed by statistical estimates of the corresponding probabilistic characteristics. When evaluating these indicators, the necessary initial data for a priori probabilistic calculations are often missing, and statistical evaluation is complicated by a small amount of testing, which can determine only estimates of moments of random

variables that determine the process of operation (mathematical expectations and variances of failure time, recovery time, backup time etc).

Therefore, in this work the problem of development of an analytical method of the decision of extreme problems of definition of bilateral estimations of functionalities which are included in the basic indicators of reliability of CN with a time reserve is solved. It is necessary to construct two-sided estimates of these indicators for CN with SDN with time redundancy at known moments of distribution of initial random variables which define random processes which are investigated. In solving this problem, the limit values of the functionals that characterize the validity of such systems are used.

The obtained results are a substantiation of the structure of computer networks that are designed or modernized. You can also use this information to build highly reliable networks or technical facilities that exist in a single implementation.

Results of the research

The ability of IT administrators to monitor the operation of the entire information network using a so-called software controller, which is separate from the switch and the level of traffic, is the basis of SDN management. Using a single control point, which is universally used in the virtual network architecture, allows administrators to take control of all switch networks [7]. This approach meets modern requirements for CN.

The network device of the control layer is separated from the data transmission layer and is logically centralized in the SDN-controller, which provides a single abstract representation of the entire network and its state. It can be deployed as a cluster to ensure high availability and scalability, as well as to provide interoperability between traffic controllers between different CN. Centralized application of increased productivity, reduction of delays leads to more efficient interaction between users and applications in both corporate networks and data center networks. The number of network devices will inevitably increase over time and a simple way to manage them, which is SDN certainly has advantages [9, 10]. This technology is a new approach to the design, construction and operation of CN, which focuses on providing business flexibility due to the effective connection of users to applications. It is a transition from managing network generating devices to managing entire networks.

The network can respond more quickly to changing business needs. The SDN controller supports an open programming interface (API), a number of built-in features, including network virtualization, security, traffic management, and authorization and authentication mechanisms to control access to the controller's integrated tools and external SDN applications, allowing external programming. thus an environment for automation, management, and scaling functionality for future applications [4, 10]. The implementation of this concept greatly simplifies the operation of the network and its configuration and allows it to be used in large

companies and small and medium-sized businesses.

Therefore, it can be argued that during the construction of CN it is advisable to implement a solution to the problem in accordance with SDN technology. This will allow companies and telecom operators to gain independent control over the entire network and greatly simplify their operation. Last but not least, greatly simplified network configuration. Administrators will not need to enter hundreds of new lines of code separately for different switches or routers. It is possible to quickly change, in real time, the characteristics of the network. Accordingly, the time to initiate new applications and services is significantly reduced, which in turn will maintain the reliability of the CN.

Let's consider features of an estimation of efficiency of CN as one of cases on probability of operability of the transmission channel. To do this, consider the process of transmitting information in the CM of continuous use with time redundancy, which consists of two elements: the transmission channel and the time reserve. Performance control will be considered ideal (complete, continuous and reliable). Formulas for the main indicators of the reliability of such a system with complete source information are given in [6].

Consider the cases when the type of distribution function $F_B(t)$ of the recovery time of the transmission channel t_B of the distribution function $D(t)$ of the value of the reserve time t_n is not set, and only their first two initial moments are known. The task is to find bilateral assessments (lower and upper limits) of the main indicators of the reliability of the system for these cases.

It is worth noting that bilateral estimates for reliability indicators are obtained under the assumption that the average operating time of the object on the failure of the transmission channel is much longer than the average recovery time. This condition is fulfilled in engineering practice for CN.

1. Let us know only the first two initial moments of the distribution function $F_B(t)$

$$s_1 = t_B = \int_0^{\infty} x dF_B(x), \quad (1)$$

$$s_2 = \int_0^{\infty} x^2 dF_B(x); \quad s_1 \leq t_n < \frac{s_1}{s_2}, \quad (2)$$

where $s_1^2 < s_2$. The class of distribution functions that satisfy such a constraint is denoted by K_2 .

For this case, in [6], bilateral estimates of the functionalities characterizing the reliability of the system are obtained. Taking into account these estimates for the reliability indicators obtained for the case of complete a priori information, the calculated ratios for the lower and upper limits of these indicators are given below. In the formulas below t_H – the average operating time of the transmission channel to failure:

$$t_H = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt. \quad (3)$$

Let the reserve time be a non-random variable $t_n = const$. For this case in [6] the exact lower ones are given $I_1(F_B)$ and upper $I_1(F_B)$ functional assessment $I_1(F_B) = F_B(t_n)$.

The probability of trouble-free operation of the system $P(t, t_n)$ depending on the delay time of the

information packet in the transmission channel:

$$P(t, t_d) \approx \exp\left[-\frac{(t-t_d)q^*}{t_H}\right] \approx \begin{cases} \exp\left(-\frac{t-t_d}{t_H}\right), & 0 < t_d < s_1; \\ \exp\left[-\frac{(t-t_d)s_1}{t_H t_d}\right], & s_1 \leq t_d < \frac{s_1}{s_2}; \\ \exp\left[-\frac{(t-t_d)(s_2-s_1^2)}{t_H(s_2-2s_1 t_d+t_d^2)}\right], & t_d \geq \frac{s_2}{s_1}; \end{cases} \quad (4)$$

$$P(t, t_d) \approx \exp\left[-\frac{(t-t_d)q^*}{t_H}\right] \approx \begin{cases} \exp\left[-\frac{(t-t_d)(s_1-t_d)^2}{t_H(s_2-2s_1 t_d+t_d^2)}\right], & 0 < t_d < s_1; \\ 1, & s_1 \leq t_d < \frac{s_2}{s_1}; \\ 1, & t_d \geq \frac{s_2}{s_1}. \end{cases} \quad (5)$$

In formulas (4) and (5) the restriction is accepted: $t - t_d \geq 0$.

Idle rate $K_{\Pi}(t_d)$. In the formula for $K_{\Pi}(t_d)$ includes functionality:

$$I_4(F_B) = M[\min(t_B, t_d)] = \int_0^{t_d} [1 - F_B(t)] dt, \quad (6)$$

for which the bottom is obtained $I_4(F_B)$ and top $I_4(F_B)$ evaluation.

Enter the notation:

$$M_* = I_4(F_B), \quad M^* = I_4(F_B). \quad (7)$$

Then the limit values of the functional $I_4(F_B)$, taking into account the entered notations will be two-way estimates of the coefficient of readiness of the transmission channel:

$$K_{\Pi}(t_d) = 1 - \frac{t_H + M_*}{t_H + s_1} = \begin{cases} 1 - \frac{t_H + t_d \frac{s_1^2}{s_2}}{t_H + s_1}, & t_d < \frac{s_2}{2s_1}; \\ 1 - (t_H + s_1)^{-1} [t_H + 0,5 \times (s_1 + t_d - \sqrt{t_d^2 - 2s_1 t_d + s_2})], & t_d \geq \frac{s_2}{2s_1}; \end{cases} \quad (8)$$

$$K_{\Pi}(t_d) = 1 - \frac{t_H + M^*}{t_H + s_1} = \begin{cases} \frac{t_H + t_d}{t_H + s_1}, & t_d < s_1; \\ 0, & t_d \geq s_1. \end{cases} \quad (9)$$

For example, consider the CN of continuous use with time redundancy.

Requirements of mobile operators for the maximum allowable packet delay time for premium services not more than 50 ms, and for standard services not more than 150 ms. [8]. Thus, different data traffic will have different time reserve values, namely 10 ms, 50 ms and 150 ms.

The studied CN will be characterized by the following data:

$$t_H = 10^4 \text{ s}, \quad s_1 = t_B = 5 \text{ ms}, \quad s_2 = 26 \text{ ms}, \\ t_{d1} = 10 \text{ ms}, \quad t_{d2} = 50 \text{ ms}, \quad t_{d3} = 150 \text{ ms}.$$

It is necessary to determine bilateral assessments of system reliability $P(t, t_d)$, $K_r(t_d)$ for three time reserve values:

$$t_{d1} = 10 \text{ ms}, \quad t_{d2} = 50 \text{ ms}, \\ t_{d3} = 150 \text{ ms}.$$

We will be interested in the upper limit of the probability of failure and the lower limits of the probability of failure and readiness.

Since $t_d \geq \frac{s_2}{s_1}$ for three values of the time reserve, the formulas for reliability indicators will be as follows:

$$P(t, t_d) \approx \exp\left[-\frac{(t-t_d)q^*}{t_H}\right] \approx \exp\left[-\frac{(t-t_d)(s_2-s_1^2)}{t_H(s_2-2s_1 t_d+t_d^2)}\right]; \quad (10)$$

$$K_{\Pi}(t_d) = \frac{t_H + M_*}{t_H + s_1} = (t_H + s_1)^{-1} \times [t_H + 0,5(s_1 + t_d - \sqrt{t_d^2 - 2s_1 t_d + s_2})]. \quad (11)$$

The results of the calculation of bilateral assessments of the reliability of the system are shown in table 1.

Table 1 – Estimates of reliability indicators

Indicator	Time reserve $t_{d1} = 10 \text{ ms}$	Time reserve $t_{d2} = 50 \text{ ms}$	Time reserve $t_{d3} = 150 \text{ ms}$
$P(t, t_d)$	0,99972	0,999996	0,9999996
$K_r(t_d)$	0,999999991	0,999999999	1

Graphs of the lower limit of the probability of failure-free operation for different data traffic or data inherent in their time reserve values are presented in Fig. 1. The analysis of the results shown in Table 1 and the graphs in Fig. 1 shows that taking into account the time reserve for the data transmission system allows to

objectively assess the reliability of the network information transmission channel in conditions of a priori uncertainty of data on random variables.

Increasing the backup time to ensure the maximum allowable packet delay time in the channel leads to an increase in the reliability of the studied systems.

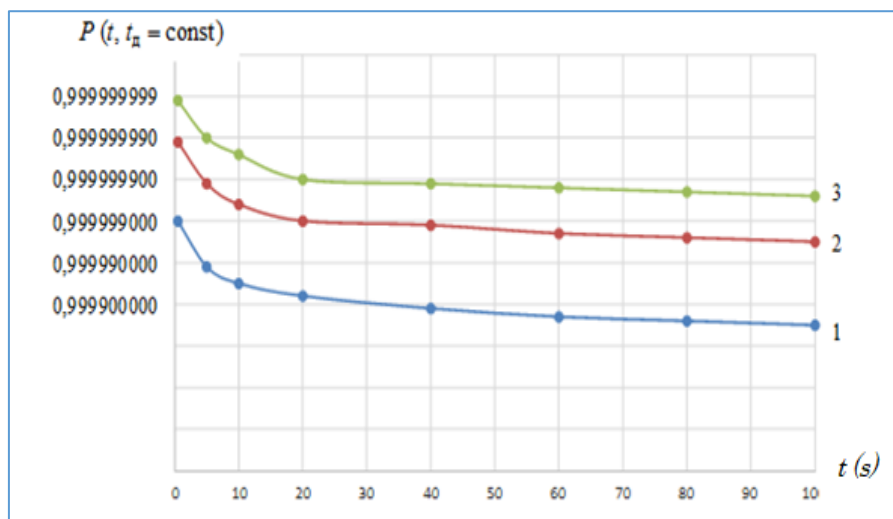


Fig. 1. The lower limit of the probability of failure
(1 – $t_{d1} = 10$ ms, 2 – $t_{d2} = 50$ ms, 3 – $t_{d3} = 150$ ms)

Thanks to the obtained guaranteed estimates of the upper limit of the probability of failure and the lower limit of the probability of failure-free operation and the coefficient of readiness, it is possible to realistically assess the quality of the CM.

Analysis of the results allows us to draw the following conclusions

The analysis conducted in the work showed that information conflicts in computer networks lead to failures. At the same time, modern computer networks operate in conditions of incomplete source information. Therefore, it is necessary to use measures to ensure a given level of reliability.

Based on the evaluation of linear and fractional-linear functionalities, the sets of calculation ratios are obtained to determine the guaranteed (largest and smallest) values of the main indicators of reliability of computer networks with a reserve. Thus, the scientific problem of development of the analytical method of the decision of an extreme problem of definition of bilateral estimations of the functionalities entering into the basic indicators of reliability of computer networks with a time reserve is solved in work. Bilateral estimates of reliability

indicators of computer networks with time redundancy at the known first two points of random variables are constructed.

In solving this problem, the limit values of the functionalities that characterize the reliability of such systems are used.

The analysis of the obtained results showed that taking into account the time reserve for the data transmission system makes it possible to objectively assess the reliability of computer networks with time reserve in the conditions of a priori uncertainty of data on determining random variables.

The obtained results are a substantiation of the structure of computer networks, which are designed or modernized. You can also use this information to build highly reliable networks or technical facilities that exist in a single implementation.

Acknowledgment

The Slovak Research and Development Agency (Agentúra na Podporu Výskumu a Vývoja) supported this work under the contract no. APVV-18-0027 titled “New methods development for reliability analysis of complex system”.

REFERENCES

1. Kulgin, M. (1999), *Technology of corporate networks*, Peter, St. Petersburg, 704 p.
2. Kulgin, M. (1998), “Introduction to the Traffic Management System”, *Journal of Network Solutions/LAN [Zhurnal setevykh resheniy/LAN]*, no. 11, pp. 25–28.
3. Hall, E. (1988), “Prioritization of traffic in IP networks”, *Networks and communication systems [Seti i sistemy svyazi]*, No. 11 (33), P. 34–39.
4. Gaidur, G.I., Ilyin, O.O. and Serich, S.O. (2017), “Information technology for the implementation of the algorithm for the synthesis of the graph for assessing the criteria for mastering competencies”, *Svyazok [Zvyazok]*, No. 4, pp. 30-34.
5. Shalimov A.V. (2020), *SDN&NFV: Technologies SDN/OpenFlow*, available at: http://lvk.cs.msu.ru/~sveta/SDN_OpenFlow_basics_lecture1.pdf
6. Kredentser, B.P., Vyshnivsky, V.V., Zherdev, M.K., Mogilevich, D.I. and Stoykova, L.S. (2013), *Assessing the reliability of redundant systems with limited source information [Otsinka nadiynosti rezervovanykh system pry obmezhenyi vykhidnyi informatsiyi]*, Phoenix, Kyiv, 335 p.
7. Gaidur, G.I. (2017), “Methods for determining the economic feasibility of maintaining an intelligent information system in conditions of a priori uncertainty”, *Modern information protection [Suchasnyy zakhyst informatsiyi]*, No. 4 (32), pp. 9-13.
8. Kuchuk, G.A. (2013), *Information technologies for integrated data flow control in information and telecommunication networks of critical systems [Informatsiyi tekhnolohiyi upravlinnya intehral'nymy potokamy danykh v informatsiyi-telekomunikatsiyi merezhakh system krytychnoho pryznachennya]*: monograph, HUPS, Kharkiv, 264 p.

9. Gnidenko, M.P., Vyshnivsky, V.V., Serykh, S.O., Zinchenko, O.V. and Prokopov, S.V. (2019), *Convergent Network Infrastructure [Konverhentna merezhna infrastruktura]*: Textbook, DUT, Kyiv, 182 p.
10. Gnidenko M.P., Vyshnivsky, V.V. and Ilyin O.O. (2019), *Building SDN networks [Pobudova SDN merezh]*: a textbook, DUT, Kyiv, 190 p.
11. Vasylenko V., Kuklov, V. and Grynkevych, G. (2016), "Analysis of SDN for wireless handover platform", *Telecommunications and Computer Science (TCSET): 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering*, Lviv: 23–26 Feb. 2016, pp. 630–633, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TCSET.2016.7452136>.

Received (Надійшла) 12.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 09.04.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

- Зінченко Ольга Валеріївна** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри штучного інтелекту, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна;
Olha Zinchenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Artificial Intelligence, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine;
 e-mail: Zinchenkoov@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3973-7814>.
- Вишнівський Віктор Вікторович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна;
Viktor Vyshnivskyi – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Computer Science, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine;
 e-mail: vish_vv@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1923-4344>.
- Березовська Юлія Володимирівна** – асистент кафедри комп'ютерних наук, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна;
Yuliia Berезovska – Assistant of Department of Computer Science, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine;
 e-mail: krasabereza@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9973-0497>.
- Седлачек Петер** – аспірант, факультет управлінських наук та інформатики, Жилінський університет, Жиліна, Словаччина;
Peter Sedlacek – postgraduate student, Faculty of Management Science and Informatics, University of Žilina, Žilina, Slovakia;
 e-mail: Peter.Sedlacek@fri.uniza.sk; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7481-6905>.

Ефективність функціонування комп'ютерних мереж із SDN в умовах неповноти інформації про надійність

О. В. Зінченко, В. В. Вишнівський, Ю. В. Березовська, П. Седлачек

Анотація. В роботі проведено аналіз ефективності функціонування комп'ютерних мереж з SDN в умовах неповноти інформації про надійність. Для того, щоб забезпечити задані показники надійності комп'ютерної мережі пропонується використовувати їх гарантовані оцінки. Для підвищення рівня безпеки функціонування інформаційних систем та ввести в процес передачі пакетів поняття резерву часу необхідно відокремити функції передачі трафіку від функцій управління. В цьому і полягає основний принцип SDN. При використанні технології SDN в комп'ютерних мережах з'являється можливість введення резерву часу при передачі повідомлень. Це дає можливість більш точно визначити показники надійності. При оцінці системи передачі даних комп'ютерної мережі врахована можливість введення резерву часу та отримані основні розрахункові співвідношення для показників надійності в умовах неповної інформації про їх закони розподілу. Априорна інформація обмежена знанням перших початкових моментів математичного сподівання та дисперсії. Дані результати являються обґрунтуванням структури комп'ютерних мереж, які проектуються або модернізуються. Також цю інформацію можна використати при побудові високонадійних мереж або технічних об'єктів, які існують в одиничному виконанні.

Ключові слова: інформаційна система; функціональна стійкість; програмно-кофігуровані мережі; мережа; передача даних; обмежена априорна інформація; безпека функціонування.

Эффективность функционирования компьютерных сетей с SDN в условиях неполноты информации о надежности

О. В. Зінченко, В. В. Вишневский, Ю. В. Березовская, П. Седлачек

Аннотация. В работе проведен анализ эффективности функционирования компьютерных сетей SDN в условиях неполноты информации о надежности. Для того, чтобы обеспечить заданные показатели надежности компьютерной сети предлагается использовать их гарантированные оценки. Для повышения уровня безопасности функционирования информационных систем и ввести в процесс передачи пакетов понятие резерва времени необходимо отделить функции передачи трафика от функций управления. В этом и заключается основной принцип SDN. При использовании технологии SDN в компьютерных сетях появляется возможность ввода резерва времени при передаче сообщений. Это дает возможность более точно определить показатели надежности. При оценке системы передачи данных компьютерной сети учтена возможность ввода резерва времени и получены основные расчетные соотношения для показателей надежности в условиях неполноты информации об их законах распределения. Априорная информация ограничена знанием первых начальных моментов математического ожидания и дисперсии. Данные результаты являются обоснованием структуры компьютерных сетей, проектируемых или модернизирующихся. Также эту информацию можно использовать при построении высоконадежных сетей или технических объектов, которые существуют в единичном исполнении.

Ключевые слова: информационная система; функциональная устойчивость; программно-кофигурируемые сети; сеть; передача данных; ограниченная априорная информация; безопасность функционирования.

А. А. Коваленко, О. С. Ляшенко, Р. О. Ярошевич

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОРГАНІЗАЦІЇ ХМАРНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Анотація. Хмарні обчислення здійснили значні зміни в ІТ-індустрії і більшість організацій тепер використовують підхід «cloud-first» у своїх технологічних потребах. Хмарна платформа – це набір сервісів і повноважень, які надають розробники. Вони надають користувачам доступ до обчислювальних ресурсів і аналітичних інструментів, а також до сховища даних, серверів, програмного забезпечення, для звичайних користувачів і великих компаній. Хмарні обчислення – це нова модель надання та використання різних ІТ-ресурсів, в тому числі обчислювальних потужностей (серверів), простору для зберігання даних, пропускну здатності мережі і додатків. Ресурси в такій моделі об'єднані в пули і надаються на вимогу, а оплата здійснюється за фактичним використанням. Сама модель відрізняється високою адаптованістю і прекрасними можливостями мережного доступу. Хмарні обчислення мають багато переваг в порівнянні з традиційними рішеннями для побудови інфраструктури підприємств, пропозицією сервісів та послуг, тощо. Серед таких переваг можна виділити: гнучкість, масштабованість, оплата за фактичне використання, висока надійність та відмовостійкість. Хмарні обчислення можуть істотно поліпшити доступність ресурсів ІТ і дають багато переваг у порівнянні з іншими обчислювальними методами. Наприклад, вони можуть забезпечити доступ до послуг без взаємодії з постачальниками послуг. І всі ресурси на хмарі доступні будь-якому користувачеві, тобто користувачі можуть динамічно орендувати фізичні або віртуальні ресурси і не повинні знати їх походження або місце проживання. Крім того, всі ресурси на платформі хмарних обчислень можуть бути розгорнуті швидко та без зупинки.

Ключові слова: хмарна інфраструктура; публічна хмара; гібридна хмара; приватна хмара.

Вступ

Більшість експертів у області технологій вважають хмарні обчислення одну з найвпливовіших ІТ-тенденцій двадцятого століття [1]. За останні два десятиліття хмарні обчислення здійснили значні зміни в ІТ-індустрії і більшість організацій тепер використовують підхід «cloud-first» у своїх технологічних потребах [2]. Хмарна платформа – це набір сервісів і повноважень, які надають розробники. Хмарні обчислення – це нова модель надання та використання різних ІТ-ресурсів, в тому числі обчислювальних потужностей (серверів), простору для зберігання даних, пропускну здатності мережі і додатків. Ресурси в такій моделі об'єднані в пули і надаються на вимогу, а оплата здійснюється за фактичним використанням. Сама модель відрізняється високою адаптованістю і прекрасними можливостями мережного доступу. Хмарні обчислення мають багато переваг в порівнянні з традиційними рішеннями для побудови інфраструктури підприємств, пропозицією сервісів та послуг, тощо [3, 4]. Серед таких переваг можна виділити: гнучкість, масштабованість, оплата за фактичне використання, висока надійність та відмовостійкість. Хмарні обчислення можуть істотно поліпшити доступність ресурсів ІТ і дають багато переваг у порівнянні з іншими обчислювальними методами. Наприклад, вони можуть забезпечити доступ до послуг без взаємодії з постачальниками послуг. І всі ресурси на хмарі доступні будь-якому користувачеві, тобто користувачі можуть динамічно орендувати фізичні або віртуальні ресурси і не повинні знати їх походження або місце проживання [5]. Крім того, всі ресурси на платформі хмарних обчислень можуть бути розгорнуті швидко та без зупинки [6].

Мета статті – ознайомитися із перевагами та недоліками хмарних провайдерів та запропонувати варіанти для вибору найбільш придатної для виконання конкретного завдання.

1. Основні сервіси хмарних обчислень

Хмарні обчислення мають такі характеристики:

- 1) самообслуговування на вимогу – споживач може в односторонньому порядку автоматично надавати обчислювальні можливості, такі як час сервера та мережеве сховище, без необхідності взаємодії людини з кожним постачальником послуг;
- 2) широкий мережний доступ – можливості доступні через мережу (рис. 1) та доступ до них здійснюється за допомогою стандартних механізмів, що сприяють використанню різнорідних тонких або товстих клієнтських платформ (наприклад, мобільних телефонів, планшетів, ноутбуків та робочих станцій);

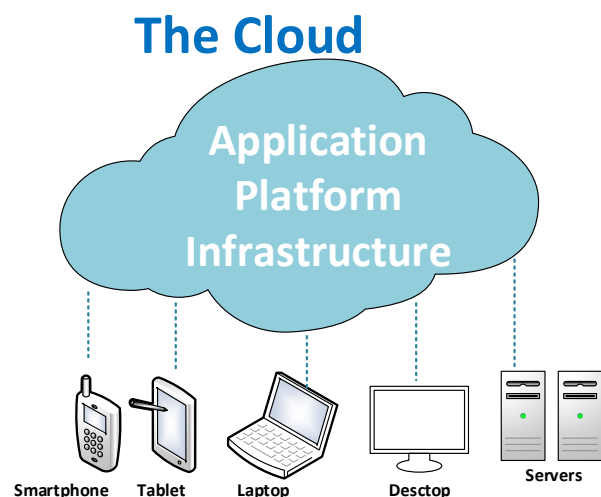


Рис. 1. Інфраструктура платформи застосунків
(Fig. 1. Application Platform Infrastructure)

- 3) пул ресурсів – обчислювальні ресурси постачальника об'єднуються для обслуговування кількох споживачів за допомогою моделі з кількома орендарями, при цьому різні фізичні та віртуальні ресурси динамічно призначаються та перепризначаються від-

повідно до попиту споживачів. Незалежність від місцезнаходження, оскільки клієнт, як правило, не має контролю або знань щодо точного розташування наданих ресурсів, але може мати можливість вказати місце розташування на більш високому рівні абстракції (наприклад, країна, або центр обробки даних). Приклади ресурсів включають зберігання, обробку, пам'ять та пропускну здатність мережі;

4) швидка еластичність – висока еластичність та масштабованість;

5) вимірюваний сервіс – хмарні системи автоматично контролюють і оптимізують використання ресурсів, використовуючи можливість вимірювання на деякому рівні абстракції, відповідному типу сервісу. Використання ресурсів можна відстежувати, контролювати і складати звіти, забезпечуючи прозорість як для постачальника, так і для споживача використовуваної послуги.

Розрізняють три варіанти реалізації хмари:

- інфраструктура як сервіс (IaaS);
- платформа як сервіс (PaaS);
- програмне забезпечення як сервіс (SaaS).

SaaS означає, що послуга, яка надана клієнту, являється додатками, що працюють на інфраструктурі хмарних обчислень, забезпеченої постачальниками послуг. До них можна отримати доступ інтерфейсами тонкого клієнта, наприклад, такими як браузер. Управління всією інфраструктурою здійснюється постачальником сервісів, а споживач управляє тільки операційною системою і встановленими додатками. Такі сервіси зазвичай оплачуються за їх фактичним використанням і дозволяють користувачеві збільшувати або зменшувати обсяг використовуваної інфраструктури через спеціальні портали, надані постачальниками сервісів. У цій моделі споживачами є власники додатків, IT-фахівці, що готують образи ОС для їх запуску в сервісній інфраструктурі. Хмарна платформа надає сервіси для запуску віртуальних машин і сервіси зберігання даних. Оплата інфраструктури як сервісу, зазвичай проводиться виходячи з обсягу використаних ресурсів.

PaaS – дається споживачеві для розгортання на хмарній інфраструктурі, що створена споживачами, або для запуску додатків, побудованих при використанні мов програмування і інструментів, які підтримуються провайдером. Споживач не керує і не контролює базову хмарну інфраструктуру, включаючи мережу, сервери, операційні системи або системи зберігання, але керує розгорнутими додатками і, можливо, додатком, що визначає конфігурацію операційного середовища [1]. Платформа як сервіс полегшує розробку, тестування, розгортання і супроводження додатків без необхідності інвестицій в інфраструктуру і програмне середовище. Платформа як сервіс також включає і інфраструктуру як сервіс. Прикладом платформи як сервіс може служити Windows Azure, Amazon Web Services (AWS). Можливості налаштування додатків під потреби споживачів не обмежені в рамках функціональності платформи. Оплата хмарної платформи розраховується виходячи з обсягу використаних обчислювальних ресурсів, таких як: час роботи програми; обсяг даних і

кількість операцій з даними (транзакцій); мережний трафік.

IaaS – пов'язаний з послугами для користувачів, які хочуть орендувати обчислювальну потужність, обсяг в системах зберігання, мережа та інші основні комп'ютерні ресурси – їх користувачі можуть розгорнути і виконати на них будь-яке програмне забезпечення, включаючи операційні системи і додатки. При цьому користувачеві не потрібно управляти або контролювати хмарну інфраструктуру, включаючи мережу, сервери, операційну систему, системи зберігання та навіть налаштування додатків [7].

З точки зору розгортання платформи хмарних обчислень включає три види:

- приватні хмари;
- публічні хмари;
- гібридні хмари.

Публічна хмара (рис. 2) – це хмарна інфраструктура, яка доступна для широкого загалу або співробітникам корпорації і належить організації, що надає хмарні сервіси. У публічних хмарах обчислювальні ресурси динамічно забезпечуються через Інтернет за допомогою веб-додатку або веб-служб [7]. Приватна хмара пов'язана з реалізацією хмарних обчислень на корпоративних мережах.

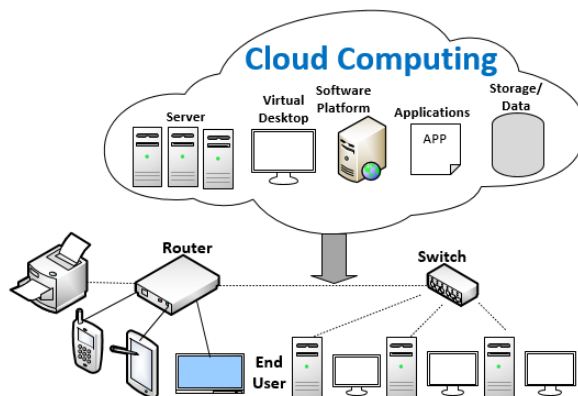


Рис. 2. Публічна хмара (Fig. 2. Public Cloud)

Приватні хмари (рис. 3) створені для виняткового використання однією групою користувачів, забезпечуючи повний контроль надають, безпекою та якістю обслуговування. Вони можуть бути побудовані і управлятися власною IT-службою компанії або постачальником хмарних сервісів [7].

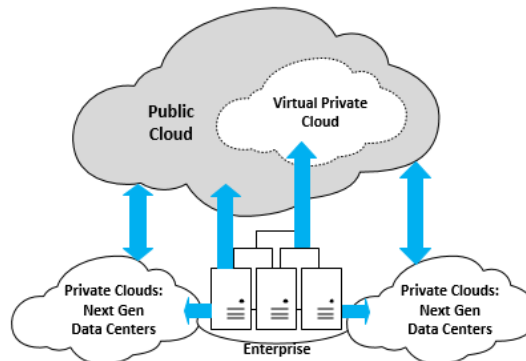


Рис. 3. Приватна хмара (Fig. 3. Private Cloud)

Гібридна хмара (рис. 4) – об'єднує безліч публічних і приватних моделей хмари, які зв'язані між собою за допомогою технології, яка забезпечує спільний доступ до даних і застосунків [7]. Дані та програми можна переміщувати між закритими і загальнодоступними хмарами. Тому гібридне хмара підвищує гнучкість, розширює можливості розгортання і допомагає оптимізувати існуючу інфраструктуру, а також системи безпеки і відповідності вимогам.

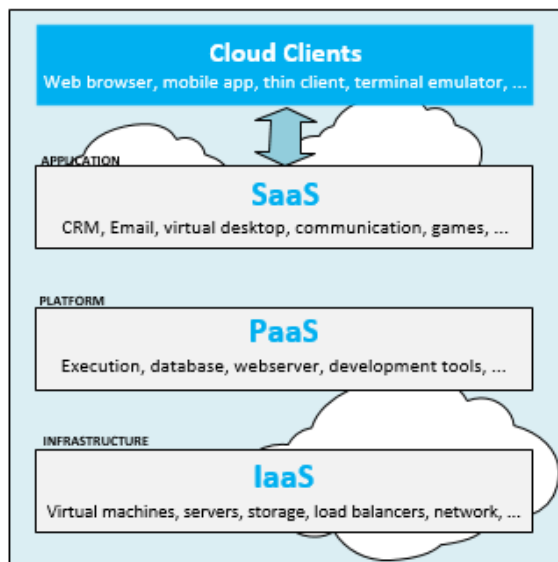


Рис. 4. Гібридна хмара (Fig. 4. Hybrid cloud)

2. Аналіз Cloud Platform

Для вибору платформи необхідно сформулювати вимоги, що пред'являються до хмари і доцільно провести пробне тестування доступних платформ. Можна відзначити такі платформи і компанії: Amazon Web Services (AWS); Windows Azure; Google Cloud; Rackspace; IBM Cloud; VMWare vCloud.

Для порівняльного аналізу візьмемо три хмарних платформи: Amazon Web Services, Windows Azure та Google Cloud. Amazon, Microsoft і Google домінують над публічним хмарним середовищем, забезпечуючи найбезпечніші, гнучкі та надійні хмарні послуги.

Відповідні хмарні платформи AWS, Azure та GCP пропонують клієнтам широкий спектр сховищ, обчислень та мережних опцій. Деякі функції, загальні для трьох платформ, включають миттєве надання, самообслуговування, автомасштабування, управління ідентифікацією та безпеку.

В даний час AWS можна вважати набагато більшим, ніж Azure та GCP з точки зору функціональності та зрілості. Amazon Web Services є провідним постачальником IaaS та PaaS, і у нього є дуже широкий асортимент послуг, в який також входять безкоштовні рівні, які дозволяють користувачам спробувати їх безкоштовно. AWS пропонує цілий ряд пропозицій "Інфраструктура як послуга" (IaaS), які можна класифікувати на обчислення, базу даних, доставку та зберігання контенту та створення мереж.

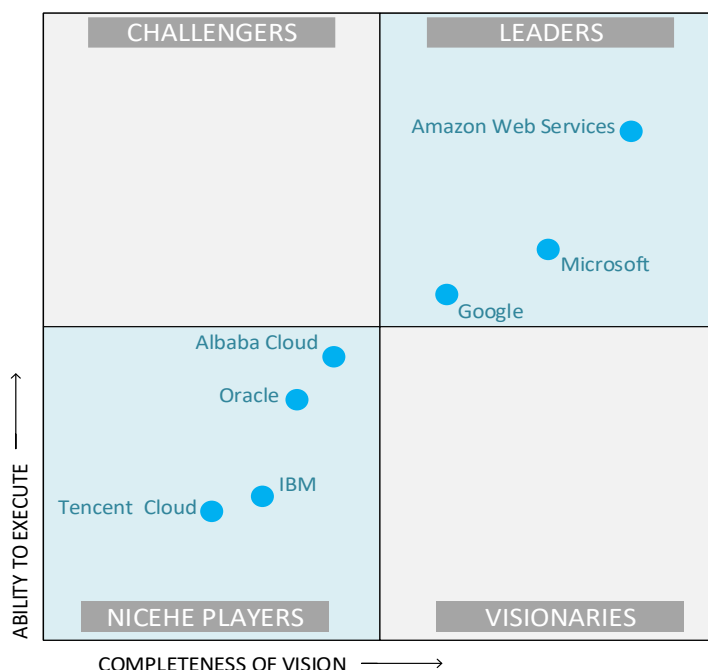


Рис. 5. Використання хмарних провайдерів (Fig. 5. Using cloud providers)

AWS забезпечує плавний та гнучкий потік збору даних за допомогою безсерверних служб, таких як Amazon Kinesis Streams, Amazon SQS Queues та AWS Lambda Functions. Він надає організаціям можливість вибору платформи веб-додатків, операційної системи, баз даних та мов програмування, серед іншого відповідно до їх вимог [8].

Використання ресурсів хмарної інфраструктури можна контролювати за допомогою інструментів управління AWS, таких як AWS CloudTrail та Amazon CloudWatch для відстеження активності користувачів та AWS Config для управління інвентаризацією ресурсів та змін [8]. AWS сприяє значному підвищенню продуктивності та росту бізнесу організацій. Деякі

недоліки AWS включають складну інфраструктуру та ліміти обслуговування за замовчуванням, які встановлюються відповідно до середніх потреб користувачів.

Центри обробки даних Amazon є найбільшими серед трьох хмарних провайдерів і розташовані в 77 регіонах світу. Microsoft – зараз пропонує більшість свого найпопулярнішого програмного забезпечення, включаючи Office та корпоративне програмне забезпечення Dynamics, на основі SaaS. А Microsoft Azure є другим за величиною постачальником IaaS та PaaS. Хмарні обчислювальні платформи Microsoft особливо популярні серед підприємств, які мають гібридні хмари.

Платформа Microsoft Azure розроблена для створення, розгортання та управління різними службами та програмами через величезну мережу центрів обробки даних, якими керує Microsoft.

Пропозиції Azure включають обчислення, створення мереж, баз даних управління продуктивністю та продуктивність.

Azure Site Recovery дозволяє організаціям будь-якого розміру організувати реплікацію між сайтами та відновлення даних для віртуальних машин, розміщених на самому Azure. Azure пропонує резервування зони (ZRS) або резервування даних у кількох регіонах ЦОД. Azure ExpressRoute полегшує підключення центру обробки даних до Azure через приватне посилання без використання Інтернету, тим самим забезпечуючи вищий рівень безпеки, більшу надійність та меншу затримку [8].

Azure також має розширені мережеві можливості, включаючи підтримку декількох з'єднань між сайтами та віртуальними мережами, а також можливість підключення віртуальних мереж у різних регіонах між собою.

Azure має найнижчі ціни на екземпляри на вимогу та зі знижкою. Спеціалісти-розробники можуть писати, тестувати та розгортати алгоритми за допомогою Студії машинного навчання Azure.

Google Cloud включає інструменти для підвищення продуктивності офісних робіт SaaS, які конкурують з Microsoft Office. Компанія також має дуже популярні пропозиції IaaS та PaaS.

Завдяки інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу, меншим витратам, вигідним екземплярам та гнучким параметрам обчислень, GCP є привабливою альтернативою як AWS, так і Azure. Google використовує повномасштабне шифрування всіх даних та каналів зв'язку, включаючи трафік між центрами обробки даних [8].

Деякі сфери, в яких Google Cloud сильно конкурує з AWS, включають налаштування екземплярів та платежів, конфіденційність та безпеку трафіку, екологічну ефективність та машинне навчання [8].

Хоча всі три хмарні провайдери пропонують знижки до 75 відсотків на зобов'язання на один-три роки, Google додатково пропонує знижку для постійного використання до 30 відсотків на кожен тип екземпляра, що працює більше 25 відсотків щомісяця.

Безкоштовна 1-річна пробна версія AWS відповідає кредиту GCP у розмірі 300 доларів США на 12 місяців, а також безкоштовному рівню, який не обме-

жений часом. Модель кредитів GCP більше підходить для організацій, які нещодавно починають користуватися хмарними послугами.

Google пропонує декілька готових API, що стосуються комп'ютерного зору, обробки природної мови та перекладу. Інженери машинного навчання можуть створювати моделі на основі бібліотеки глибокого навчання TensorFlow з відкритим кодом Google Cloud Machine Learning Engine.

3. Розгортання інфраструктури

Порівняння хмарних провайдерів в даній статті ґрунтується на періоді часу розгортання тестового середовища. До тестового середовища входить: віртуальні машини та бази даних. Віртуальні машини – основа для будь-якої інфраструктури, яка в свою чергу необхідна для розгортання програми. Функції віртуальних мереж є важливим аспектом для створення захищеної та надійної інфраструктури. Всі ці сервіси є у вибраних для аналізу провайдерів, проте носять різні назви:

- 1) для AWS – Elastic Compute Cloud (EC2) та Relation Database Service (RDS);
- 2) для Azure – Azure Container Instances (ACI) та Azure SQL Database;
- 3) для Google Cloud Platform – Compute Engine (GCE), Virtual Private Cloud (VPC).

Схема тестової інфраструктури представлена на рис. 6.

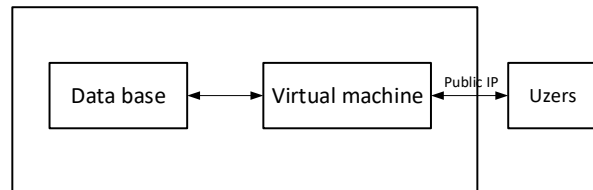


Рис. 6. Тестова інфраструктура (Fig. 6. Test infrastructure)

Протягом семи днів проводилося розгортання тестової інфраструктури у всіх трьох обраних провайдерів. Для автоматизації розгортання використовується Terraform [9]. Використовувалися віртуальні машини з такими параметрами: 1 ядро CPU, 2 GB віртуальної пам'яті RAM, ОС – Linux; для бази даних використовувалися 2 ядра CPU та 4 GB RAM.

У таблиці 1 наведено час розгортання, дисперсія для регіонів Європа (Frankfurt) і Америка (East) та вартість ресурсів у різних провайдерів.

При перегляді результатів можна побачити, що час розгортання і дисперсія всієї інфраструктури у всіх провайдерів відрізняється незначно, причому флуктуації (випадкове відхилення) цих параметрів так само не значні. При розгортання в різних регіонах (Америка і Європа) відрізняється вартість і затримка. Дисперсія має значну відмінність більше 100 мс, вартість відрізняється не значно. Варто врахувати що у цих трьох провайдерів є система знижок при тривалому застосуванні сервісів.

В середньому можна отримати знижку від 30 до 60 відсотків, що може бути вирішальним фактором при виборі провайдера.

Таблиця 1 – Результати аналізу

	Europe (Frankfurt)					
	1 virtual machine			2 virtual machines		
	AWS	GCP	Azure	AWS	GCP	Azure
Ціна (\$)	1.62	3.1	4.12	3.23	6.19	8.23
Час (м)	6.1	6.3	6.4	7.3	7.6	8.05
Дисперсія(мс)	41	40	41	41	40	41
	America (East)					
	1 virtual machine			2 virtual machines		
	AWS	GCP	Azure	AWS	GCP	Azure
Ціна (\$)	1.41	2.47	3.75	2.81	4.93	7.49
Час (м)	6.1	6.3	6.4	7.3	7.6	8.05
Дисперсія(мс)	150	149	151	150	149	151

При виборі хмарного провайдера варто звернути увагу на якій операційній системі будуть працювати сервера. Якщо це буде Windows, то краще звернути увагу на Azure. GCP останнім з цих трьох провайдерів вийшов на ринок, тому проводить агресивну цінову політику що дає результат залучення нових клієнтів і збільшення частки GCP на ринку.

Висновки

Ознайомившись із найважливішими плюсами і мінусами цих трьох хмарних провайдерів, стає очевидним, що кожна з трьох хмарних платформ AWS, Azure та GCP по-своєму унікальна і пропонує безліч варіантів для вибору організацій на основі їхніх конкретних вимог. Основною перевагою хмарних платформ є те, що вони пропонують ефективні інструменти для всляких обчислень з можливістю віддаленого управління, а також масштабування незалежно від часу і фізичного місця розташування.

AWS має центральну обчислювальну мережну службу на основі Elastic Compute Cloud (EC2). У нього також інтегровані такі підсервіси, як AWS Elastic Beanstalk, Amazon EC2 Container Service і деякі інші корисні інструменти. Такі інструменти дозволяють підприємствам проводити глибокий аналіз і планування, зводячи до мінімуму фінансові втрати при запуску нових проєктів. Територіально AWS підтримує регіональне і зональне покриття.

Microsoft Azure використовує високопродуктивні Virtual Machine Scale Sets в якості центру обробки даних. Клієнтські програми для Windows розгортаються за допомогою RemoteApp.

Google Cloud Platform використовує сервіс Compute Engine для обчислювальної потужності. Він підтримує більшість основних інструментів хмарної платформи. Єдиний серйозний недолік, про який слід згадати, – це ціна – вона безумовно не найгнучкіша серед трійці Google Cloud vs Amazon AWS vs Azure.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tucha [Електронний ресурс]: Гібридне сховище. – Режим доступу: <http://tucha.ua/blog/gibridnoe-oblako/>
2. Сервіоніка [Електронний ресурс]: Гібридне сховище. – Режим доступу: <http://servionica.ru/services/138/>
3. ZDNet [Електронний ресурс]: Hybrid cloud: What it is, why it matters. – Режим доступу: <http://www.zdnet.com/article/hybrid-cloud-what-it-is-why-it-matters/>
4. The NIST Definition of Cloud Computing – Mell, Peter and Grance, Timothy, 2011 – 6 с.
5. Wikipedia [Електронний ресурс]: – Google Drive. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Google_Drive
6. Google. Enable API. – Google. – Режим доступу: <https://console.developers.google.com/flows/enableapi?apiid=drive>
7. Богданов А. В., Е Мьинт Найнг. Сравнение нескольких платформ облачных вычислений. *Вестник СПбГУ*. 2013. Серия 10, выпуск 2. С. 102-110.
8. Cynthia Harvey. AWS vs Azure vs Google Cloud: 2021 Cloud Platform Comparison. 2020. URL: <https://www.datamation.com/cloud/aws-vs-azure-vs-google-cloud>
9. Terraform documentation. URL: <https://www.terraform.io/docs/index.html>

REFERENCES

1. Tucha, *Hybrid storage*, available at: <http://tucha.ua/blog/gibridnoe-oblako/>.
2. Servio, *Hybrid storage*, available at: <http://servionica.ru/services/138/>.
3. ZDNet, *Hybrid cloud: What is it, why it matters*, available at: <http://www.zdnet.com/article/hybrid-cloud-what-it-is-why-it-matters>.

4. Mell, Peter and Grance, Timothy (2011), *The NIST Definition of Cloud Computing*, 6 p.
5. Wikipedia, *Google Drive*, available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Google_Drive.
6. Google, *Enable API Google*, available at: <https://console.developers.google.com/flows/enableapi?apiid=drive>.
7. Bogdanov, A.V. and Ye Myint, Naing (2013), "A comparison of several cloud computing platforms", *Vestnik St. Petersburg University*, Ser. 10, Issue 2, pp. 102-110.
8. Cynthia, Harvey (2020), *AWS vs Azure vs Google Cloud: 2021 Cloud Platform Comparison*, available to: <https://www.data-nation.com/cloud/aws-vs-azure-vs-google-cloud>
9. (2021), *Terraform documentation*, available to: <https://www.terraform.io/docs/index.html>

Надійшла (received) 12.02.2021

Прийнята до друку (accepted for publication) 14.04.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Коваленко Андрій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Andriy Kovalenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: andriy_kovalenko@yahoo.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2817-9036>.

Ляшенко Олексій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету комп'ютерної інженерії та управління, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Oleksii Liashenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of Faculty of Computer Engineering and Control, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: oleksii.liashenko@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0146-3934>.

Ярошевич Роман Олександрович – асистент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Roman Yaroshevych – Assistant, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: roman.yaroshevych@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7949-1513>.

Сравнительный анализ организации облачной инфраструктуры

А. А. Коваленко, А. С. Ляшенко, Р. А. Ярошевич

Аннотация. Большинство экспертов в области технологий считают облачные вычисления одной из самых влиятельных ИТ-тенденций XXI века. За последние два десятилетия облачные вычисления осуществили значительные изменения в ИТ-индустрии и большинство организаций теперь используют подход «cloud-first» в своих технологических нуждах. Облачная платформа — это набор сервисов и возможностей, которые предоставляют разработчики. Они предоставляют пользователям доступ к вычислительным ресурсам и аналитическим инструментам, а также в хранилище данных, серверов, ПО и т.д., для обычных пользователей и крупных компаний. Облачные вычисления — это новая модель предоставления и использования различных ИТ-ресурсов, в том числе вычислительных мощностей (серверов), пространства для хранения данных, пропускной способности сети и приложений. Ресурсы в такой модели объединены в пулы и предоставляются по требованию, а оплата осуществляется по фактическому использованию. Сама модель отличается высокой адаптированности и прекрасными возможностями сетевого доступа. Облачные вычисления имеют много преимуществ по сравнению с традиционными решениями для построения инфраструктуры предприятий, предложением сервисов и услуг и тому подобное. Среди таких преимуществ можно выделить: гибкость, масштабируемость, оплата за фактическое использование, высокая надежность и отказоустойчивость. Облачные вычисления могут существенно улучшить доступность ресурсов ИТ и дают много преимуществ по сравнению с другими вычислительными методами. Например, они могут обеспечить доступ к услугам без взаимодействия с поставщиками услуг. И все ресурсы на облаке доступны любому пользователю, то есть пользователи могут динамически арендовать физические или виртуальные ресурсы и не должны знать их происхождения или место жительства. Кроме того, все ресурсы на платформе облачных вычислений могут быть развернуты быстро и без остановки.

Ключевые слова: облачная инфраструктура; публичное облако; гибридное облако; частное облако.

Comparative analysis of the organization of cloud infrastructure

Andriy Kovalenko, Oleksii Liashenko, Roman Yaroshevych

Abstract. Most technology experts consider cloud computing to be one of the most influential IT trends of the twenty-first century. Over the past two decades, cloud computing has made significant changes in the IT industry, and most organizations now use the cloud-first approach in their technology needs. The cloud platform is a set of services and credentials provided by developers. They provide users with access to computing resources and analytics tools, as well as data warehouses, servers, software, etc., for regular users and large companies. Cloud computing is a new model of providing and using a variety of IT resources, including computing power (servers), storage space, network bandwidth and applications. Resources in this model are pooled and provided on demand, and payment is made for actual use. The model itself is highly adaptable and has excellent network access capabilities. Cloud computing has many advantages over traditional enterprise infrastructure solutions, offering services and services, and more. Such advantages include: flexibility, scalability, payment for actual use, high reliability, and failover. Cloud computing can significantly improve the availability of IT resources and provide many advantages over other computing methods. For example, they can provide access to services without interacting with service providers. And all the resources on the cloud are available to any user, ie users can dynamically rent physical or virtual resources and do not need to know their origin or place of residence. In addition, all resources on the cloud computing platform can be deployed quickly and without stopping.

Keywords: cloud infrastructure; public cloud; hybrid cloud; private cloud.

Н. Г. Кучук¹, О. В. Шефер², Г. П. Чернева^{3,4}, Алнаері Фрхат Алі²

¹ Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

² Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна,

³ Транспортний університет “Тодор Каблешков”, Софія, Болгарія

⁴ Південно-Західний Університет, Благоевград, Болгарія

ВИЗНАЧЕННЯ ПРОПУСКНИХ ЗДАТНОСТЕЙ САМОВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО СЕГМЕНТА МЕРЕЖІ

Анотація. Запропоновано підхід до визначення пропускних здатностей самовідновлювального сегмента мережі передачі даних. **Предметом дослідження** є автономні сегменти телекомунікаційної мережі, які володіють властивістю самовідновлення. **Об’єктом дослідження** є процес передачі інформації між вузлами автономного сегмента. **Наукова новизна** полягає в удосконаленні методу визначення пропускних здатностей самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі при обмежених мережних ресурсах шляхом застосування критерію забезпечення мінімального часу доставки інформації при заданій границі можливої ймовірності втрат. Були вирішені такі **завдання**: розроблена математична модель самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі у вигляді системи масового обслуговування; запропонований спосіб розрахунку ступеню завантаженості каналу. **Висновок:** запропонований підхід надав можливість розрахувати пропускні спроможності каналів зв’язку самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі і необхідний обсяг буферної пам’яті при відомій топології мережі і заданій матриці тяжіння, що забезпечують необхідні значення ймовірності відмови і гарантують мінімальний час доставки повідомлень.

Ключові слова: самовідновлення; телекомунікаційна мережа; пропускна здатність; сегмент мережі.

Вступ

У міру того, як сучасні програмні системи і додатки набувають універсальності і функціональності, стає все більш необхідною можливість управляти несумісними ресурсами і обслуговувати різноманітні вимоги користувачів. Крім того, по мірі ускладнення систем виправлення системних збоїв і відновлення після шкідливих атак стають більш складними, трудомісткими, дорогими і схильними до помилок. Ці чинники активізували дослідження, що стосуються концепції систем самовідновлення.

Самовідновлювальні системи (СВС) характеризуються автоматичним виявленням збоїв системи і прийомами відновлення після таких ситуацій. Самовідновлення – це вбудований механізм, який підтримує систему в порядку. Система самовідновлення може активно відстежувати і виявляти потенційні відхилення від своїх стандартних параметрів, перевіряти їх з певним ступенем достовірності і відновлювати нормальні операції без втручання людини. У СВС обов’язковий механізм моніторингу та виявлення, який постійно контролює систему, щоб переконатися, що вона працює нормально, і повідомляє про будь-які відхилення від очікуваної поведінки. Такий механізм знає метрики ідеального або допустимого діапазону, які він відстежує. Він включає в себе моніторинг серверів, моніторинг мережі, моніторинг баз даних, моніторинг журналів і моніторинг продуктивності застосунків, а також інші інструменти. Також в СВС обов’язковий протокол відновлення, який вживає необхідних заходів для відновлення нормальної роботи системи без допомоги ззовні.

Забезпечуючи раннє виявлення і відновлення системи, системи самовідновлення можуть значно знизити середній час відновлення. Автоматизація більшості процесів моніторингу також може привести до значного скорочення витрат і зниження за-

тримки на обслуговування. На додаток до відсутних переваг, впровадження систем самовідновлення може позитивно вплинути на багато нематеріальних аспектів, таких як задоволеність клієнтів і задоволеність співробітників. Скорочення часу простою системи означає, що підприємства можуть більше зосередитися на своєму реальному бізнесі, ніж на управлінні IT-завданнями, що підвищує узгодженість надання їх послуг.

Однак при всіх позитивних тенденціях СВС припускають надмірність Software and Hardware. Крім того, система моніторингу вимагає незначних, але постійних витрат обчислювального ресурсу. Це призводить до зниження показників QoS [1, 2]. Тому необхідні нові моделі і методи обробки даних, орієнтовані на специфіку СВС. Зокрема, одним із низки таких завдань є розробка методу визначення пропускних здатностей самовідновлювального сегмента мережі, який орієнтований на врахування специфічних властивостей самовідновлювальних систем.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Використання точних методів розв’язання задачі визначення пропускних здатностей самовідновлювального сегмента мережі [3, 4] при існуючих можливостях ЕОМ обчислювальної техніки неможливо. Підходи до розрахунку пропускних здатностей, запропоновані у [5], припускають локальне масштабування мережних фрагментів як вертикальне, так і горизонтальне, але не орієнтовані на врахування властивості самовідновлення. Методика розрахунку, розглянута у [6], орієнтована на вузькоспеціалізовані мережі. Низку методів розрахунку, наведених у [7, 8], можна застосовувати лише при наявності у мережі фрактального або самоподібного трафіка. Для використання методики розрахунку, запропонованої у [9], необхідно наявність оперативних емпіричних даних, що не відповідає наведеній вище постановці завдання. Отже на сьогодні існуючі методики визна-

чення пропускних здатностей не орієнтовані на самовідновлювальні сегменти мережі

Отже, метою даного дослідження є розробка методу визначення пропускних здатностей самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі при обмежених мережних ресурсах за критерієм забезпечення мінімального часу доставки інформації при заданій ймовірності втрач.

Результати досліджень

Самовідновлювальний сегмент телекомунікаційної мережі моделюються у вигляді системи масового обслуговування (СМО) типу М/М/п з обмеженою чергою (п-канальна СМО з очікуванням), на яку надходить пуассонівський потік запитів з сумарною інтенсивністю λ , інтенсивністю обслуговування для кожного каналу μ і числом місць у черзі, що дорівнює m . Черги пов'язані зі входом до кожного сегменту, яка утворена пучком із n каналів і колективно використовуваною пам'яттю в кожному напрямку, що містить m елементів пам'яті. Для кожної самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі середня кількість зайнятих каналів визначається як

$$\bar{z} = \rho \left(1 - \frac{\rho^{n+m}}{n^m n!} P_0 \right), \quad (1)$$

де $\rho = \lambda/\mu$ – середня завантаженість каналів, а P_0 – ймовірність того, що канали вільні і немає черги, котру можна розрахувати таким чином:

$$P_0 = \left[\sum_{\alpha=0}^n \frac{\rho^\alpha}{\alpha!} + \frac{\rho^n}{n!} \sum_{\alpha=1}^m \left(\frac{\rho}{n} \right)^\alpha \right]^{-1} = \left[\sum_{\alpha=0}^n \frac{(n\chi)^\alpha}{\alpha!} + \frac{(n\chi)^n}{n!} \sum_{\alpha=1}^m \chi^\alpha \right]^{-1}, \quad (2)$$

де $\chi = \rho/n$ – ступінь завантаженості каналу.

Тоді середня кількість запитів, що знаходяться в черзі у самовідновлювальному сегменті телекомунікаційної мережі, може бути знайдено як

$$\bar{r} = \frac{(n\chi)^{n+1} P_0}{nn!} \sum_{\alpha=1}^m \alpha \chi^{\alpha-1}. \quad (3)$$

Підсумовуючи вирази (1) і (3), отримаємо середню кількість запитів у СМО:

$$\bar{W} = \bar{z} + \bar{r}. \quad (4)$$

Ймовірність відмови (зайнятості всіх каналів і місць в черзі) дорівнює:

$$P_{відм} = \frac{\rho^{n+m}}{n! \cdot n^m} \cdot P_0. \quad (5)$$

Зафіксуємо ймовірність відмови на деякому допустимому рівні:

$$P_{відм} \leq P_{відм}^{доп}, \quad (6)$$

тоді для граничного значення $P_{відм}^{доп}$ з виразу (5) визначимо P_0 :

$$P_0 = \frac{n! \cdot n^m}{(n \cdot \chi)^{n+m}} \cdot P_{відм}^{доп}. \quad (7)$$

Використовуючи (7) зробимо спрощення виразів (1) і (3):

$$\bar{r} = P_{відм}^{доп} \cdot \sum_{\alpha=1}^m \alpha \cdot \chi^{-(m-\alpha)}; \quad (8)$$

$$\bar{z} = n\chi \left(1 - P_{відм}^{доп} \right). \quad (9)$$

Підставивши їх до виразу (1), отримаємо вираз для середньої кількості запитів у СМО:

$$\bar{W} = n\chi \left(1 - P_{відм}^{доп} \right) + P_{відм}^{доп} \sum_{\alpha=1}^m \alpha \chi^{-(m-\alpha)}. \quad (10)$$

Співвідношення (10) справедливо для будь-якого сегмента ізотропної мережі, в якій ρ не залежить від напрямку передачі. Однак в анізотропних мережах незалежна змінна χ і значення m , n , $P_{відм}^{доп}$ залежать від напрямку передачі для кожного i -го самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі таким чином, що

$$\bar{W}_i = n_i \chi_i \left(1 - P_{відм}^{доп} \right) + P_{відм}^{доп} \sum_{\alpha=1}^{m_i} \alpha \cdot \chi_i^{-(m_i-\alpha)}, \quad i = \bar{1}, k. \quad (11)$$

Використовуючи формулу Літгла і клейнроківську апроксимацію, маємо

$$\gamma \bar{T}_{зад} = \sum_{i=1}^k \bar{W}_i. \quad (12)$$

Умова (12) з урахуванням (11) визначає середній час затримки пакетів у самовідновлювальному сегменту телекомунікаційної мережі:

$$\bar{T}_{зад} = (1/\gamma) \times \sum_{i=1}^k \left[P_{відм}^{доп} \sum_{\alpha=1}^{m_i} \alpha \cdot \chi_i^{-(m_i-\alpha)} + n_i \cdot \chi_i \left(1 - P_{відм}^{доп} \right) \right]. \quad (13)$$

Введення умови (6) дало можливість не тільки спростити функціонал оптимізації за рахунок виключення громіздкого виразу (2), а й ввести другий якісний показник - ймовірність відмови, допустиме значення якого може бути задано у вигляді вимоги користувачів мережі. При цьому функція (13) має екстремум (мінімум), пошук якого є задачею безумовної оптимізації.

Шляхом обчислення часткових похідних

$$\partial \bar{T}_{зад} / \partial \chi_i = 0 \quad (14)$$

отримуємо абсолютний екстремум, який в силу унімодалності $\bar{T}_{зад}$ є глобальним. При традиційному методі оптимізації необхідно ставити функцію вартості в якості обмеження, так як початкова функція не містить екстремуму, але є опуклою, і пошук екстремуму вирішується як задача умовної оптимізації, що

має деяку множину відносних екстремумів. Крім того, даний метод вільний від суб'єктивізму у виборі функції вартості, тому що застосування будь-якої її форми не може бути переконливо аргументовано для конкретних умов завдання.

В силу адитивності функції (13) після обчислення часткових похідних (14) отримуємо систему алгебраїчних рівнянь

$$\partial \bar{W}_i / \partial \chi_i = 0, \quad i = \overline{1, k}, \quad (15)$$

кожне з яких є функцією однієї незалежної змінної (властивість сепарабельності), тобто

$$\partial \bar{W}_i / \partial \chi_i = d \bar{W}_i / d \chi_i = 0. \quad (16)$$

Обчислення (16) з урахуванням (11) приводить до системи k рівнянь такого вигляду:

$$\sum_{\alpha=1}^{m_i-1} (m_i - \alpha) \alpha \chi_i^{-(m_i-\alpha+1)} = n_i \frac{1 - P_{i \text{ відм}}^{\text{доо}}}{P_{i \text{ відм}}^{\text{доо}}}, \quad i = \overline{1, k}, \quad (17)$$

що визначають значення $\chi_i = \chi_i^{\text{onm}}$ функцій змінних $m, n, P_{i \text{ відм}}^{\text{доо}}$, які забезпечують мінімальний середній час доставлення пакета. Однак за умовами завдання прийнятними значеннями χ_i^{onm} є ті, що розташовуються на поверхні, яка визначається виразами, отриманими з (5):

$$\frac{(n_i \chi_i)^{n_i + m_i}}{n_i! n_i^{m_i}} = P_{i \text{ відм}}^{\text{доо}} \cdot \sum_{\alpha=0}^{n_i} \frac{(n_i \chi_i)^\alpha}{\alpha!} + \frac{(n_i \chi_i)^{n_i}}{n_i!} \sum_{\alpha=1}^{m_i} \chi_i^\alpha. \quad (18)$$

Перетворимо вираз (17) до такого вигляду:

$$\left[1 + \frac{1}{n_i} \sum_{\alpha=1}^{m_i-1} (m_i - \alpha) \alpha \chi_i^{-(m_i-\alpha+1)} \right]^{-1} = P_{i \text{ відм}}^{\text{доо}}. \quad (19)$$

З огляду на, що праві частини рівнянь (18) і (19) однакові і постійні, прийнятні оптимальні значення ${}^{np} \chi_i^{\text{onm}}$ знайдемо з умови:

$$\frac{n_i!}{(n_i \chi_i)^n} \sum_{\alpha=0}^{n_i} \frac{(n_i \chi_i)^\alpha}{\alpha!} = \sum_{\alpha=1}^{m_i} \left[\frac{\alpha(m_i - \alpha)}{n_i} - \chi_i \right] \chi_i^{\alpha-1}, \quad i = \overline{1, k}. \quad (20)$$

Аналіз виразу (20) показує, що прийнятні значення ${}^{np} \chi_i^{\text{onm}}$ не залежить від необхідного значення ймовірності відмови $P_{i \text{ відм}}^{\text{доо}}$ і є функціями дискретних значень кількості каналів (n_i) і кількості місць у черзі (m_i).

Кожне рівняння системи (29) є функцією однієї змінної χ_i і дає можливість незалежно визначити прийнятне оптимальне значення ступеня завантаження каналу для кожного сегмента мережі. Однак

отримати точний аналітичний розв'язок (20) не представляється можливим, вважаючи на його трансцендентність, але його можна отримати програмно чисельним методом. Тоді досить вирішити одне з рівнянь (20) відносно

$$\begin{aligned} {}^{np} \chi_i^{\text{onm}} &= \frac{\lambda_i}{n_i \mu_i} = \frac{L \lambda_i}{n_i L \mu_i} = \frac{F_i}{V n_i}; \\ {}^{np} \chi^{\text{onm}} &= f(m_i, n_i), \end{aligned} \quad (21)$$

де $F_i = L \lambda_i$ – сумарний потік на вході i -го сегмента; $V_i = L \mu_i$ – пропускна здатність кожного з n каналів.

Решта значення можуть відрізнятись числом буферів m_i або каналів n_i . Оптимізація по χ_i дозволяє варіювати величинами V_i і в залежності від класу трафіку F_i надавати на вимогу користувача будь-яку сукупність каналів зі змінною шириною бітових швидкостей передачі, формуючи кожен раз віртуальний канал зі змінною пропускною здатністю незалежно від необхідної P_0 , при цьому час доставки інформації буде залишатися мінімальним.

Рішення рівняння (20) можна здійснити графічним методом (рис. 1), представивши його у вигляді

$$F(n, m, \chi) = \frac{n_i!}{(n_i \chi_i)^n} \sum_{\alpha=0}^{n_i} \frac{(n_i \chi_i)^\alpha}{\alpha!} - \sum_{\alpha=1}^{m_i} \left[\frac{\alpha(m_i - \alpha)}{n_i} - \chi_i \right] \chi_i^{\alpha-1} = 0, \quad i = \overline{1, k}. \quad (22)$$

Прийнятні оптимальні значення ${}^{np} \chi_i^{\text{onm}}$ визначаються координатами точок перетину цих кривих з віссю χ . Аналіз графіків показує, що існує три варіанти вирішення в залежності від співвідношення величин n і m .

Якщо функція $F(n, m, \chi)$ не перетинає вісь χ , то прийнятних екстремальних значень функції не існує (наприклад, при $n = 2$ і $m = 4$). Функція $F(n, m, \chi)$ може бути дотичною до осі χ і тоді точка дотику буде єдиним значенням.

У третьому випадку є дві точки перетину. Однак значення $\chi > 1$ у другій точці призводять до швидкого зростання $\bar{T}_{\text{зад}}$ і $P_{i \text{ відм}}^{\text{доо}}$. За фізичним змістом і умовами завдання прийнятними є значення меншого за величиною кореня.

Аналіз виразів (21) показує, що вони є незалежними. Вирази (21) визначають умову, за якої можна здійснити варіювання числом каналів і їх пропускною здатністю в залежності від класу трафіку, надаючи користувачу сукупність каналів із заданою шириною смуги пропускання в межах отриманого значення ${}^{np} \chi_i^{\text{onm}}$, залишаючи середній час затримки мінімальним незалежно від величини необхідного значення ймовірності втрати пакетів внаслідок відмов в обслуговуванні для мережі відомої топології.

Поєднання умов (14, 20, 21) графічно відображено на рис. 2, що побудований з використанням пакета Mathcad.

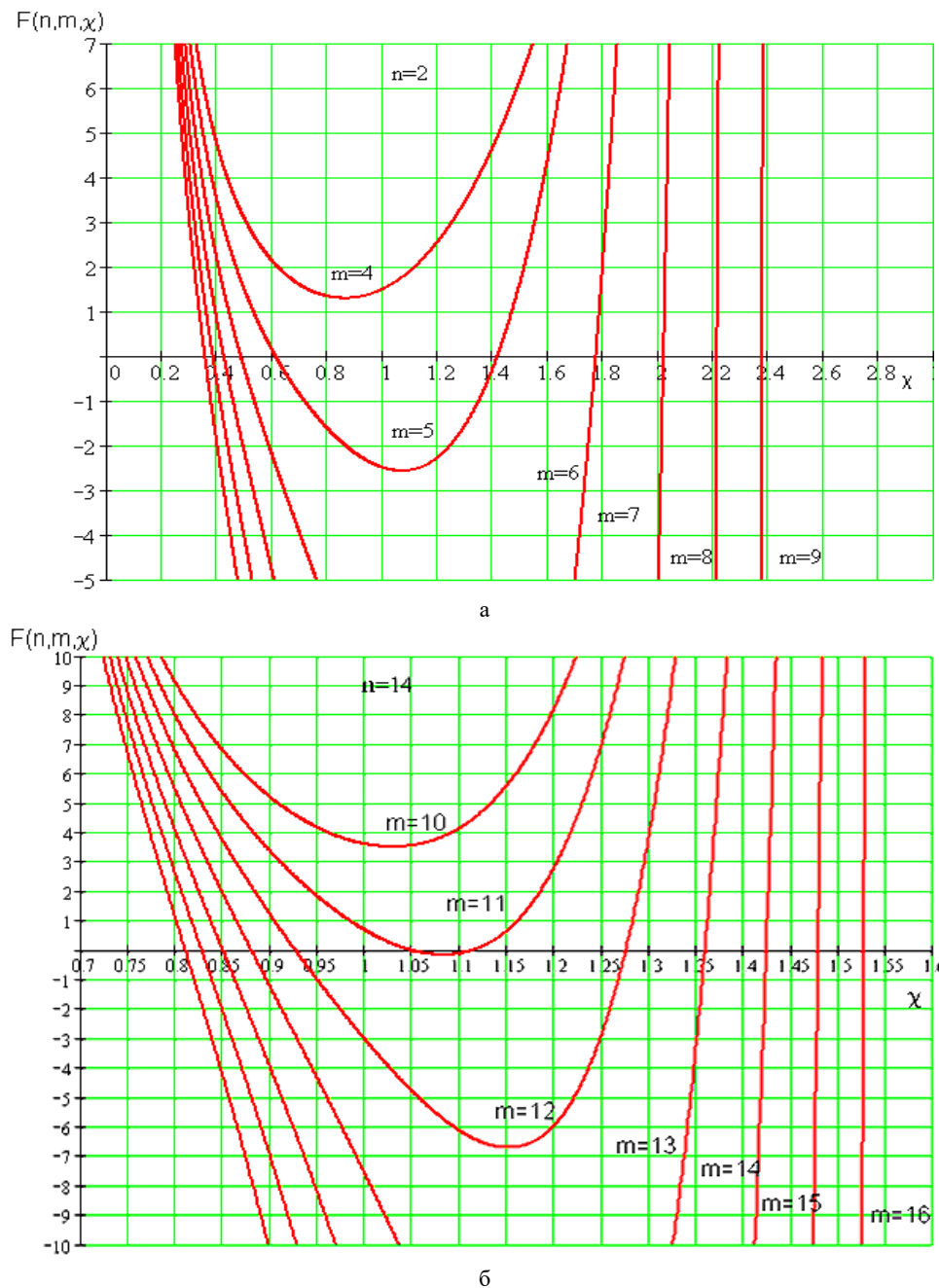


Рис. 1. Визначення ${}^{np}\chi_i^{om}$ для самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі:

(Fig. 1. Definitions ${}^{np}\chi_i^{om}$ for the self-healing segment of telecommunication networks)

a – $n=2, m=5-9$; б – $n=14, m=12-16$

Рис. 2 дозволяє зробити висновок, що в межах встановлених значень параметрів часової прозорості самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі, можна здійснити обмін пропускної здатності каналу на обсяг буферної пам'яті на вході в даний канал. Аналіз показує, що такий обмін може бути здійснений за умови підтримання сталості таких якісних показників мережі, як час затримки і ймовірність втрати пакетів.

Висновок

Таким чином, отримані з графіків рис. 2 значення спільно з співвідношенням (21) дають можливість розрахувати пропускні спроможності каналів

зв'язку V_i самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі і необхідний обсяг буферної пам'яті m_i при відомій топології мережі і заданій матриці тяжіння $\|\lambda_{ij}\|$, що забезпечують необхідні значення ймовірності відмови і гарантують мінімальний час доставки повідомлень.

Отже, розроблено метод визначення пропускних здатностей самовідновлювального сегмента телекомунікаційної мережі при обмежених мережних ресурсах за критерієм забезпечення мінімального часу доставки інформації при заданій ймовірності втрат.

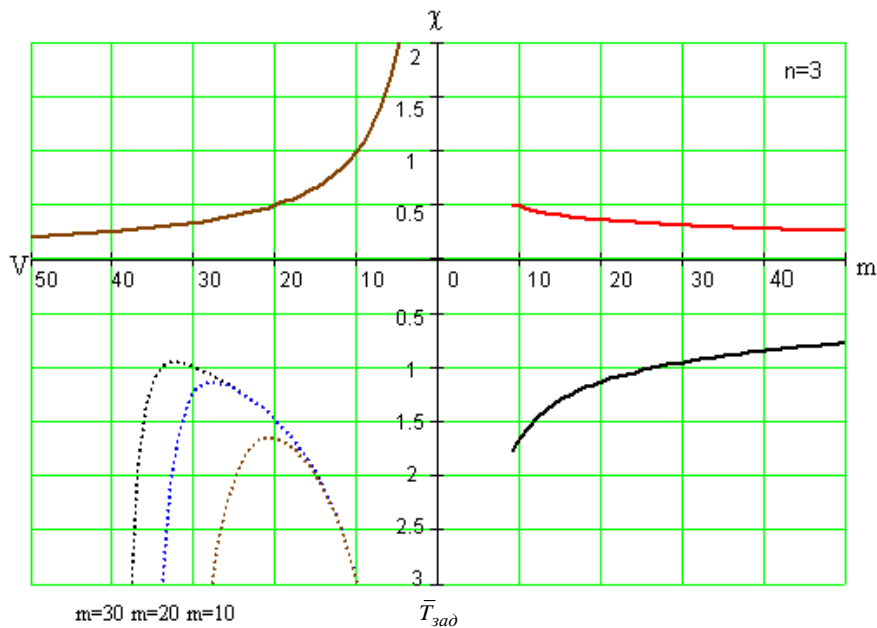


Рис. 2. Суміщений графік залежностей $\chi(m)$, $\chi(V)$, $\bar{T}_{3ad}(m)$, $\bar{T}_{3ad}(V)$
 (Fig. 2. Combined graph $\chi(m)$, $\chi(V)$, $\bar{T}_{3ad}(m)$, $\bar{T}_{3ad}(V)$)

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Shefer O.V., Alnaeri Frhat Ali. Optimum flow distribution in the network with adaptive data transfer. *Electronics and Control Systems*. 2020. No. 4(66). P.45-50. DOI: <https://doi.org/10.18372/1990-5548.66.15254>
2. Fang Shuguang, Dong Yuning, Shi Haixian. Approximate Modeling of Wireless Channel Based on Service Process Burstiness. *Proceedings of the International Conference on Wireless Networks (ICWN)*; Athens: 1-7. Athens: The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing, (WorldComp).
3. Sobieraj M., Stasiak M., Weissenberg J. Analytical model of the single threshold mechanism with hysteresis for multi-service networks. *IEICE Transactions on Communications*. 2012. Vol. E95.B, No. 1. P. 120–132.
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., Kacprzyk J. (eds) *Green IT Engineering: Social, Business and Industrial Applications. Studies in Systems, Decision and Control*. Vol 171. Cham: Springer, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8
5. Kurose J., Ross, K. *Computer networking: a top-down approach*, 7th ed. Harlow: Pearson, 2017. 864 p.
6. Ruban I.V., Martovytskyi V.O., Kovalenko A.A., Lukova-Chuiko N.V. Identification in Informative Systems on the Basis of Users' Behaviour. *Proceedings of the International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2019-September*, 9019446. 2019. P. 574-577. DOI: <https://doi.org/10.1109/CAOL46282.2019.9019446>
7. Chen Y.G., Feng J. Fractal-based exponential distribution of urban density and self-affine fractal forms of cities. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2012. 45(11). P. 1404-1416.
8. Kuchuk N., Mozhaiev O., Mozhaiev M., Kuchuk H. Method for calculating of R-learning traffic peakedness. *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2017 – Proceedings*. 2017. P. 359-362. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246416>
9. Vapnik V. (), *Estimation of Dependences based on Empirical Data*, N.-Y., Berlin : Springer-Verlag, 1987. 326 p.

REFERENCES

1. Shefer, O.V. and Alnaeri, Frhat Ali (2020), "Optimum flow distribution in the network with adaptive data transfer", *Electronics and Control Systems*, No. 4(66), pp.45-50, DOI: <https://doi.org/10.18372/1990-5548.66.15254>.
2. Fang, Shuguang, Dong, Yuning and Shi, Haixian (2012), "Approximate Modeling of Wireless Channel Based on Service Process Burstiness", *Proceedings of the International Conference on Wireless Networks (ICWN)*; Athens: 1-7. Athens: The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing, (WorldComp).
3. Sobieraj, M., Stasiak, M. and Weissenberg, J. (2012), "Analytical model of the single threshold mechanism with hysteresis for multi-service networks", *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E95.B No. 1, pp. 120–132.
4. Kuchuk, G., Kovalenko, A., Komari, I.E., Svyrydov, A. and Kharchenko, V. (2019), "Improving Big Data Centers Energy Efficiency: Traffic Based Model and Method", In: Kharchenko V., Kondratenko Y., Kacprzyk J. (eds) *Green IT Engineering: Social, Business and Industrial Applications. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Springer, Cham, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8.
5. Kurose, J. and Ross, K. (2017), *Computer networking: a top-down approach*, 7th ed., Harlow: Pearson, 864 p.
6. Ruban, I.V., Martovytskyi, V.O., Kovalenko, A.A. and Lukova-Chuiko, N.V. (2019), "Identification in Informative Systems on the Basis of Users' Behaviour", *Proceedings of the International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2019-September*, 9019446, pp. 574-577, DOI: <https://doi.org/10.1109/CAOL46282.2019.9019446>.

7. Chen, Y.G. and Feng, J. (2012). "Fractal-based exponential distribution of urban density and self-affine fractal forms of cities", *Chaos, Solitons & Fractals*, 45(11): 1404-1416.
8. Kuchuk, N., Mozhaiev, O., Mozhaiev, M. and Kuchuk, H. (2017), "Method for calculating of R-learning traffic peakedness", *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2017 – Proceedings*, pp. 359-362, DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246416>.
9. Vapnik, V. (1987), *Estimation of Dependences based on Empirical Data*, Springer-Verlag, N.-Y., Berlin, 326 p.

Надійшла (received) 26.02.2021

Прийнята до друку (accepted for publication) 28.04.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Кучук Ніна Георгіївна – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Nina Kuchuk – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Computer Science and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: nina_kuchuk@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0784-1465>.

Шефер Олександр Віталійович – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;

Oleksandr Shefer – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine;

e-mail: avs075@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3415-349X>.

Чернева Галіна Петкова – доктор наук (комунікаційні технології), професор, Транспортний університет "Тодор Каблешков", Софія, Південно-Західний Університет, Благоевград, Болгарія;

Galina Cherneva – Doctor of Sciences, (Communication Technology), Professor, "Todor Kableshkov" University of Transport, Sofia, South West University, Blagoevgrad, Bulgaria;

e-mail: cherneva@vtu.bg, gcherneva@swu.bg; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7441-0270>.

Алнаєрі Фрхат Алі – аспірант кафедри автоматизації, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;

Alnaeri Frhat Ali – Postgraduate student of the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine;

e-mail: farhat.anaeri@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1807-7893>.

Определение пропускных способностей самовосстанавливающегося сегмента сети

Н. Г. Кучук, А. В. Шефер, Г. П. Чернева, Алнаєрі Фрхат Алі

Аннотация. Предложен подход к определению пропускных способностей самовосстанавливающегося сегмента сети передачи данных. **Предметом исследования** являются автономные сегменты телекоммуникационной сети, которые обладают свойством самовосстановления. **Объектом исследования** является процесс передачи информации между узлами автономного сегмента. **Научная новизна** заключается в усовершенствовании метода определения пропускных способностей самовосстанавливающегося сегмента телекоммуникационной сети при ограниченных сетевых ресурсах путем применения критерия обеспечения минимального времени доставки информации при заданной границе возможной вероятности потерь. Были решены следующие **задачи**: разработана математическая модель самовосстанавливающегося сегмента телекоммуникационной сети в виде системы массового обслуживания; предложен способ расчета степени загруженности канала. **Вывод:** предложенный подход дал возможность рассчитать пропускные способности каналов связи самовосстанавливающегося сегмента телекоммуникационной сети и необходимый объем буферной памяти при известной топологии сети и заданной матрицы тяготений, которые при этом обеспечивают требуемые значения вероятности отказа и гарантируют минимальное время доставки сообщений.

Ключевые слова: самовосстановление; телекоммуникационная сеть; пропускная способность; сегмент сети.

Determining the capacity of the self-healing network segment

Nina Kuchuk, Oleksandr Shefer, Galina Cherneva, Alnaeri Frhat Ali

Abstract. An approach to determining the bandwidth of the self-healing segment of the data network is proposed. The subject of the study are autonomous segments of the telecommunications network, which have the property of self-healing. The object of research is the process of information transfer between nodes of an autonomous segment. The scientific novelty is to improve the method of determining the capacity of the self-healing segment of the telecommunications network with limited network resources by applying the criterion of ensuring the minimum time of information delivery at a given limit of possible probability of loss. The following tasks were solved: a mathematical model of the self-healing segment of the telecommunication network in the form of a queuing system was developed; the proposed method of calculating the degree of channel congestion. Conclusion: the proposed approach made it possible to calculate the bandwidth of the communication channels of the self-healing segment of the telecommunications network and the required amount of buffer memory with a known network topology and a given gravity matrix, providing the required values of failure probability and guarantee minimum message delivery time.

Keywords: self-healing; telecommunication network; bandwidth; network segment.

Л. М. Сакович, Г. Я. Криховецький, О. В. Міхін, Ю. В. Мирошніченко

Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

ОЦІНКА ВПЛИВУ МЕТРОЛОГІЧНОГО ТА ДІАГНОСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА СТАНОМ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ

Анотація. Мета статті – кількісна оцінка впливу якості метрологічного та діагностичного забезпечення на формування послідовності і обмеження кількості перевірок при технічному обслуговуванні за станом складних радіоелектронних комплексів, включаючи сучасні засоби зв'язку з цифровою обробкою інформації. В результаті аналізу існуючої системи технічного обслуговування встановлено переваги обслуговування виробів за станом. При цьому для визначення послідовності перевірок не в повній мірі враховують властивості метрологічного і діагностичного забезпечення. **Результати дослідження.** У статті вперше розглянуто і отримано кількісну оцінку впливу метрологічного та діагностичного забезпечення на показники якості технічного обслуговування засобів зв'язку. Показано, що найбільший вплив на час виконання технічного обслуговування та ймовірність визначення при цьому технічного стану виробів оказує діагностичне забезпечення робіт з використанням сучасного метрологічного забезпечення. Також показано, що на значення показників якості технічного обслуговування значно впливають підготовка фахівців та технологічне оснащення ремонтного органу, вміння виконавців в повному обсязі використовувати можливості сучасних засобів виміральної техніки. **Висновок.** Отримані результати доцільно використовувати при удосконаленні існуючих або створення нових інструкцій технічного обслуговування за станом перспективних засобів зв'язку або інших складних виробів радіоелектронних систем.

Ключові слова: засоби зв'язку; метрологічне та діагностичне забезпечення; технічне обслуговування за станом.

Вступ

Технічне обслуговування засобів зв'язку – невід'ємна частина їх технічної експлуатації, яка суттєво впливає на надійність системи зв'язку. Існують різноманітні принципи організації технічного обслуговування, але найбільш ефективним є технічне обслуговування за станом засобів зв'язку. Для його практичного впровадження відсутні конкретні рекомендації щодо визначення послідовності виконання перевірок засобів зв'язку, їх мінімально необхідної кількості, потрібних для цього засобів виміральної техніки. Безперервно розвиваються теорія експлуатації складних систем, технічна діагностика їх обладнання, метрологія. Але ці досягнення не використовують в існуючих інструкціях технічного обслуговування засобів зв'язку. Тому стаття присвячена кількісній оцінці впливу метрологічного та діагностичного забезпечення технічного обслуговування за станом засобів зв'язку для наукового обґрунтування підходів до його впровадження в реальних умовах з метою досягнення максимального ефекту.

Постановка завдання. Метрологічне забезпечення (МЗ) технічних пристроїв – комплекс науково-технічних та організаційно-технічних заходів, а також діяльність відповідних організацій і фахівців, спрямованих на забезпечення єдності та точності вимірювань для досягнення необхідних характеристик функціонування технічних пристроїв [1].

Діагностичне забезпечення (ДЗ) – комплекс взаємно погоджених правил, методів, алгоритмів і засобів, необхідних для здійснення діагностування на всіх етапах життєвого циклу об'єкту (ДСТУ 2389-94). Важливе завдання технічного діагностування – визначення технічного стану (ТС) об'єктів під час технічного обслуговування (ТО) і поточного ремонту (ПР) із заданою точністю. Достовірність

технічного діагностування – ступінь об'єктивної відповідності діагнозу дійсному ТС об'єкту, що характеризується в певний момент часу за певних умов зовнішнього середовища значеннями параметрів, встановлених технічною документацією на об'єкт (ДСТУ 2389-94).

Поступове впровадження методів і засобів цифрової обробки інформації у виробках військового призначення без відповідного їх МЗ та ДЗ викликає труднощі при визначенні реального ТС в процесі ТО і ПР цифрових пристроїв засобів зв'язку.

Таким чином, виникає необхідність визначення впливу якості МЗ та ДЗ на оцінку реального ТС засобів зв'язку під час їх ТО і ПР для обґрунтованого вибору послідовності і необхідної кількості вимірювань значень параметрів при практичному впровадженні технічного обслуговування за станом (ТОС).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Система ТО – сукупність взаємопов'язаних засобів, виконавців і документації для підтримання та відновлення справного чи працездатного ТС виробів під час їх технічної експлуатації. Вид ТО виробів відрізняється за однією з ознак: етапом експлуатації, періодичністю, обсягом робіт, умовами експлуатації, регламентацією тощо.

Метод ТО – сукупність технологічних і організаційних правил виконання операцій ТО виробів (ДСТУ В 3576-97).

До основних завдань ТО належать:

- попередження передчасного зносу механічних елементів та виходу електричних параметрів апаратури за межі встановлених норм;
- виявлення та усунення несправностей та причин їх виникнення;
- доведення параметрів та характеристик до норм;

- продовження строків служби та термінів експлуатації.

Принципи організації ТО [2]:

- календарний – роботи проводяться через визначені відрізки часу незалежно від напрацювання (легко планувати, але перевитрати сил і засобів на ТО техніки, яка не працювала);

- за напрацюванням – роботи проводяться після досягнення визначеного напрацювання (важко планувати, але економія сил і засобів);

- комбінований – роботи проводяться не тільки після напрацювання апаратури визначеної кількості годин, але й у певний календарний час.

При цьому розрізняють стратегії ТО [2]:

- стратегія за напрацюванням – передбачає єдиний обсяг та періодичність робіт незалежно від фактичної потреби в них кожного конкретного виробу;

- стратегія за станом – перевірка параметрів виробу із заданою періодичністю, а перелік робіт залежить від результатів контролю.

В останньому випадку легко планувати строки виконання ТО і досягається економія сил та засобів без зниження якості робіт. Більш надійну апаратуру обслуговують рідше. При цьому під час ТО більш глибоко контролюють ТС, що дозволяє уникнути великої кількості відмов.

В ранніх роботах [3] обґрунтована ефективність ТОС, в [2] приведено методику визначення періодичності перевірки параметрів. Також обґрунтовано критерії якості ТО.

В [4] вперше запропоновано визначити послідовність перевірок параметрів залежно від часу і вартості їх виконання, важливості впливу параметру на працездатність виробу та ймовірності помилки виконавця в оцінці значення параметру.

За останні роки проведено дослідження в галузі технічної діагностики [5, 6] і метрології [7, 8] та показано вплив метрологічної надійності на час виконання ТО [9, 10]. Зазначену обставину враховано в [11], але відсутня оцінка впливу МЗ та ДЗ на формування послідовності перевірок виробу під час ТОС. В подальшому отримані результати досліджень використане в методичному обґрунтуванні порядку перевірки параметрів при ТОС радіоелектронних комплексів [12].

З проведеного аналізу слідує, що в даний час найбільш доцільно використовувати ТОС складних радіоелектронних комплексів, при цьому необхідно, під час формування послідовності перевірок і обмеженні їх кількості, врахувати особливості МЗ та ДЗ, які відсутні у відомих роботах.

Мета статті – кількісна оцінка впливу якості МЗ та ДЗ на формування послідовності і обмеження кількості перевірок при ТОС складних радіоелектронних комплексів, включаючи сучасні засоби зв'язу з цифровою обробкою інформації.

Основна частина

В розглянутих роботах встановлено, що в першу чергу доцільно перевіряти параметри найменш надійних підсистем, або конструктивних одиниць

виробу. Крім того, час вимірювань параметрів і усунення виявлених несправностей також повинні бути мінімальними. Ці вимоги враховує ймовірність переважного вибору (ЙПВ) параметру [11, 12]

$$u_i = \frac{P_{zi} V_i p_i}{\tau_i f_i q_i},$$

що має некеровані зміни, які безпосередньо залежать від об'єкту: p_i – ймовірність відмови підсистеми i ; V_i – значимість впливу підсистеми i на працездатність виробу в цілому (можливо з частковою втратою якості).

Значення p_i визначають під час розрахунку надійності виробу

$$p_i = z_i / \sum_{j=1}^M z_j = z_i T; \quad \sum_{i=1}^M p_i = 1;$$

де z_i – параметр потоку відмов підсистеми i ; M – загальна кількість підсистем виробу; T – наробіток виробу на відмову.

Значення V_i визначають в результаті експертного опитування фахівців або обробки статистичних даних про відмови виробу та їх вплив на зниження якості функціонування, при цьому

$$\sum_{i=1}^M V_i = 1.$$

В такому випадку на їх значення під час ТО виробу впливати неможливо, тому позначимо

$$p_i V_i = C_i = const.$$

Інші зміни ЙПВ керовані в процесі виконання ТО та залежать від якості МЗ та ДЗ.

Метрологічні характеристики засобів виміральної техніки (ЗВТ) суттєво впливають на значення ЙПВ:

$$P_{zi} = \prod_{j=1}^{m_i} P_j,$$

де P_{zi} – метрологічна надійність m_i ЗВТ, що використовують при оцінці значення параметрів P_j підсистеми i .

Під метрологічною надійністю розуміють ймовірність безвідмовної роботи ЗВТ в міжповірочний період.

Вибір ЗВТ також впливає на q_i – ймовірність помилки фахівця при оцінці результату перевірки i .

Вона також залежить від умов проведення ТО і може змінюватись в досить широких межах: $0,003 \leq q_i \leq 0,3$.

Мінімум q_i при використанні цифрових ЗВТ в стаціонарних умовах, а максимум при використанні аналогових ЗВТ в польових умовах. Якщо $1 \leq m_i \leq 3$, то орієнтовно за даними [7 – 11]

$$0,91 \leq P_{zi} \leq 0,97.$$

Тобто вплив МЗ на ЙПВ змінюється в досить широких межах

$$30 \leq P_{zi}/q_i \leq 300.$$

На інші керовані змінні впливають якість ДЗ і підготовка фахівців ремонтного органу:

$$\tau_i = t_i / \sum_{j=1}^M t_j; \quad \sum_{i=1}^M \tau_i = 1;$$

де t_i – час перевірки працездатності підсистеми i ; τ_i – відносний час перевірки підсистеми i в порівнянні з виробом в цілому.

Якщо для оцінки ТС підсистеми i використовувати умовні алгоритми [5, 6], то отримуємо граничні значення для алгоритмів мінімальної і максимальної форми

$$t \log_2 L_i \leq t_i \leq 0,5L_i t,$$

де t – середній час виконання перевірки; L_i – кількість елементів підсистеми i .

В такому разі якщо $\sum_{i=1}^M L_i = L$ – загальна кількість елементів виробу, отримуємо межі зміни значення τ_i :

$$\frac{\log_2 L_i}{\sum_{j=1}^M \log_2 L_j} \leq \tau_i \leq \frac{L_i}{L}.$$

Остання керована змінна залежить від якості ДЗ, технологічного оснащення ремонтного органу і кваліфікації фахівців:

$$f_i = \frac{t_{bi}}{\sum_{j=1}^M t_{bj}}; \quad \sum_{i=1}^M f_i = 1;$$

де f_i – відносний час відновлення підсистеми i після її відмови (відхилення значення параметру за допустимі межі); t_{bi} – час відновлення підсистеми i .

Після розрахунку u_i ($i = \overline{1, M}$) всіх підсистем виробу виконують нормування ЙПВ [12]:

$$U_i = \frac{u_i}{\sum_{j=1}^M u_j}; \quad \sum_{i=1}^M U_i = 1.$$

В подальшому підсистеми виробу ранжирують в порядку зменшення значення U_i . Після перевірки $1 \leq n \leq M$ підсистем ймовірність справного стану виробу дорівнює

$$P(n) = \sum_{i=1}^n L_i / L.$$

При обмеженому часі ТО і заданому значенні ймовірності визначення ТС P_d підсистеми перевіряють у встановленому порядку до виконання умови:

$$\sum_{i=1}^n U_i \geq P_d; \quad 1 \leq n \leq M.$$

При цьому час перевірки виробу при ТОС дорівнює

$$T_n = \sum_{i=1}^n t_i.$$

Розглянемо використання отриманих результатів на прикладі табл. 1 із [12], де δ_i – ймовірність правильної оцінки результату перевірки ($q_i = 1 - \delta_i$).

Таблиця 1 – Вихідні дані підсистем виробу

i	$z_i 10^{-6}, \text{год}^{-1}$	$t_i, \text{хв}$	$t_{bi}, \text{хв}$	δ_i	P_{zi}	V_i	L_i	q_i
1	4	15	10	0,942	0,85	0,025	80	0,058
2	4	15	12	0,931	0,88	0,025	120	0,069
3	10	20	15	0,910	0,81	0,050	370	0,090
4	10	20	20	0,988	0,79	0,050	410	0,012
5	6	10	11	0,945	0,91	0,050	350	0,055
6	7	10	8	0,956	0,88	0,050	430	0,044
7	6	10	16	0,912	0,93	0,050	330	0,088
8	25	30	25	0,980	0,95	0,200	110	0,020
9	4	15	22	0,982	0,89	0,200	70	0,018
10	4	15	18	0,901	0,87	0,200	510	0,099
11	20	25	24	0,985	0,88	0,100	360	0,015

Результати моделювання за відомою методикою [12] з визначенням рангу R_i (порядку перевірки підсистем) приведено в табл. 2. З використанням отриманих зауважень отримуємо результати, які приведені в табл. 3.

Таблиця 2 – Визначення порядку перевірки підсистем

i	τ_i	f_i	P_i	u_i	U_i	R_i
1	0,054	0,055	0,04	4,934	0,0158	9
2	0,065	0,066	0,04	2,973	0,0095	11
3	0,082	0,083	0,10	6,612	0,0212	8
4	0,108	0,110	0,10	27,707	0,0888	4
5	0,059	0,061	0,06	13,792	0,0442	6
6	0,043	0,044	0,07	36,998	0,1186	3
7	0,086	0,088	0,06	4,189	0,0134	10
8	0,145	0,138	0,25	118,691	0,3805	1
9	0,119	0,121	0,04	27,471	0,0881	5
10	0,097	0,099	0,04	7,321	0,0235	7
11	0,142	0,135	0,20	61,207	0,1964	2

Таблиця 3 – Результати розрахунку ймовірності переважного вибору

i	C_i	P_{zi}/q_i	$\log_2 L_i$	τ_i	u_i	U_i	R_i
1	0,001	14,65	6,32	0,074	2,199	0,0091	10
2	0,001	12,75	6,67	0,078	1,816	0,0075	11
3	0,005	9,00	8,26	0,098	5,102	0,0211	8
4	0,005	65,80	8,65	0,101	36,194	0,1500	2
5	0,003	16,54	8,25	0,097	5,684	0,0235	7
6	0,0035	20,00	8,66	0,101	7,701	0,0319	4
7	0,003	10,57	8,24	0,097	3,632	0,0150	9
8	0,050	47,50	6,66	0,078	33,832	0,1402	3
9	0,008	49,44	6,13	0,072	6,104	0,0253	6
10	0,008	8,79	8,97	0,106	7,371	0,0305	5
11	0,020	58,67	8,49	0,099	131,695	0,5459	1

Для порівняння результатів в однакових умовах розрахуємо середній час виконання перевірки згідно [12] в припущенні, що ТС підсистем також визначався з використанням умовних алгоритмів діагностування:

$$t = \sum_{i=1}^{11} t_i / \sum_{i=1}^{11} \log_2 L_i = 2,17 \text{ хв.}$$

Середній час відновлення при відмові будь-якої підсистеми

$$t_b = \sum_{i=1}^{11} t_{bi} / 11 = 16,45 \text{ хв.}$$

Результати порівняння середнього часу ПР після визначення відхилення значення параметру при ТОС виробу зведено в табл. 4.

Залежності $T_{пр}(R_C)$ згідно [12] і $T_{пр}(R_H)$ згідно табл. 4 приведено на рис. 1.

Таблиця 4 – Розрахунок часу поточного ремонту

i	Згідно [12]			$T_{пр} = k_i t + t_b$				
	R_c	$k_i t$	t_{bi}	$T_{пр}(R_c)$	R_H	$k_i t$	$T_{прi}$	$T_{пр}(R_H)$
1	9	15	10	313	10	13,7	30,1	335,1
2	11	15	12	366	11	14,5	30,9	366,0
3	8	20	15	288	8	17,9	34,3	270,6
4	4	20	20	162	2	18,8	35,2	70,1
5	6	10	11	220	7	17,9	34,4	236,3
6	3	10	8	122	4	18,8	35,3	136,2
7	10	10	16	339	9	17,9	34,4	305,0
8	1	30	25	55	3	14,4	30,8	100,9
9	5	15	22	199	6	13,3	29,8	201,9
10	7	15	18	253	5	19,5	35,9	172,1
11	2	25	24	104	1	18,4	34,9	34,9

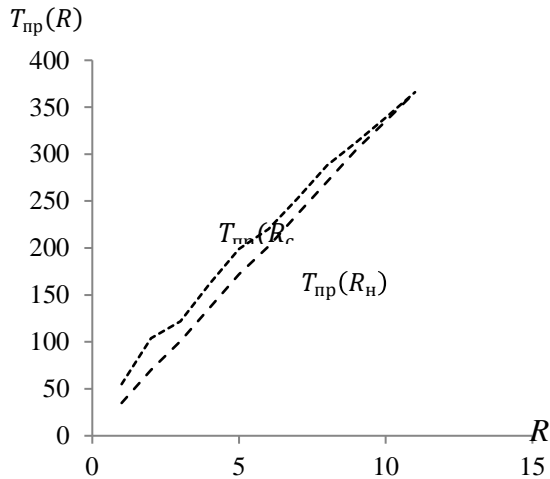


Рис. 1. Залежності середнього часу поточного ремонту виробу при використанні існуючого і запропонованого підходів до ранжування порядку виконання перевірок (Fig. 1. Dependencies of a product current repair average time at use of the existing and offered approaches to ranking of the checks performance order)

Значення абсолютного середнього виграшу в часі виконання ПР дорівнює

$$\Delta_T = \sum_{i=1}^M [T_{прi}(R_c) - T_{прi}(R_H)] / M.$$

Для прикладу, що розглянуто, $\Delta_T = 17,44$ хв. Відносний виграш в часі виконання ПР

$$\delta_T = \frac{\Delta_T}{\max T_{пр}(R_c)} \cdot 100\% = 4,76\%.$$

Взагалі маємо виграш в скороченні часу ПР після визначення відхилення параметру від норми, якщо після виконання $1 \leq M \leq R$ перевірок згідно ранжування параметрів

$$\sum_{i=1}^r (t_i + t_{bi}) > \sum_{i=1}^r (k_i t + t_b).$$

Розглянемо залежності важливого показника ТОС – ймовірності правильної оцінки ТС після виконання визначеної кількості перевірок згідно встановленого рейтингу, що приведено в табл. 5 і відображено на рис. 2 для розглянутого прикладу, де

$$P(r) = \sum_{i=1}^r L_i / L; \quad 1 \leq r \leq R.$$

Таблиця 5 – Залежності ймовірності правильної оцінки технічного стану виробу від кількості перевірок параметрів

i	Згідно [12]			Згідно R_H		
	R_c	$\sum_{i=1}^r L_i$	$P(R_c)$	R_H	$\sum_{i=1}^r L_i$	$P(R_H)$
1	9	2690	0,8567	10	3020	0,9618
2	11	3140	1,000	11	3140	1,000
3	8	2610	0,8312	8	2610	0,8312
4	4	1310	0,4172	2	770	0,2452
5	6	1730	0,55095	7	2240	0,7134
6	3	900	0,2866	4	1310	0,4172
7	10	3020	0,9618	9	2940	0,9363
8	1	110	0,0350	3	880	0,2802
9	5	1380	0,4395	6	1890	0,6020
10	7	2240	0,7134	5	1820	0,5796
11	2	470	0,1497	1	360	0,1146

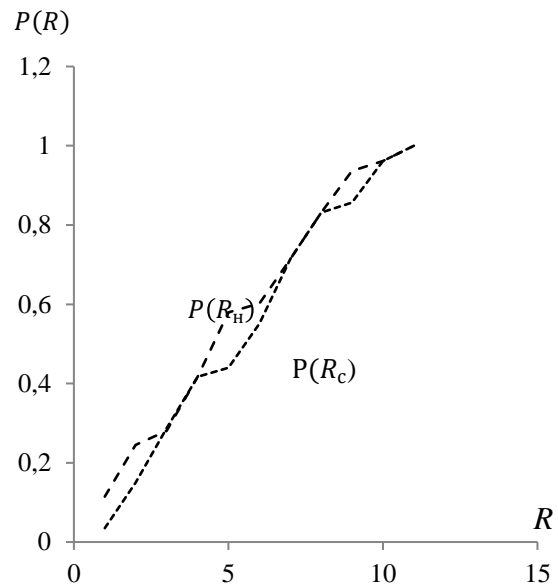


Рис. 2. Залежності ймовірності правильної оцінки технічного стану виробу від кількості перевірок параметрів (Fig. 2. Dependencies of correct assessment probability of the product technical condition on the number of parameter checks)

Аналіз отриманих результатів показує, що $P(R_c) \leq P(R_H)$. При цьому відносний виграш в збільшенні ймовірності правильної оцінки ТС виробу під час ТОС дорівнює:

$$\delta_P = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [P_i(R_H) - P_i(R_c)] \cdot 100\%.$$

Для прикладу, що розглядається, отримуємо $\delta_P = 4,1\%$. При обмеженому часі виконання ТОС отримана залежність дозволяє при заданому значенні ймовірності оцінки ТС виробу визначити необхідну кількість перевірок (рис. 2) та час на їх виконання (рис. 1). Наприклад, при заданій ймовірності визначення ТС виробу не менше 0,9 згідно [12] необхідно виконати 10 перевірок, а з врахуванням отриманих результатів достатньо 9, що на 9% менше. При цьому час виконання перевірок скорочується з 339 хв до 305 хв, що також менше на 10% (табл. 4).

Таким чином показано, що удосконалення МЗ та ДЗ під час ТОС дозволяє покращити часові та ймовірнісні показники процесу.

Висновки

В результаті аналізу існуючої системи технічного обслуговування встановлено переваги обслуговування виробів за станом. При цьому для визначення послідовності перевірок не в повній мірі враховують властивості метрологічного і діагностичного забезпечення.

Встановлено межі впливу метрологічного і діагностичного забезпечення на значення ймовірності переважного вибору перевірок для їх подальшого ранжування. На конкретному прикладі показано переваги врахування сучасних досягнень в галузі

метрології і технічної діагностики при кількісній оцінці значення ймовірності переважного вибору перевірок, що дозволило до 5% підвищити достовірність оцінки технічного стану виробу при відповідному зниженні часу, а також до 10% скоротити кількість перевірок при забезпеченні заданої достовірності оцінки технічного стану.

Подальші дослідження доцільно направити на удосконалення технічних операцій виконання технічного обслуговування за станом складних радіоелектронних комплексів для підвищення його ефективності, особливо при обмеженому часі та в польових умовах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України “Про метрологію та метрологічну діяльність” від 05.06.2014 № 1314-VII. Відомості Верховної Ради, 2014, № 30, ст. 1008
2. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. Москва: Высшая школа, 1982, 231 с
3. Василишин В.І., Женжера С.В., Чечуй О.В., Глушко А.П. Основи теорії надійності та експлуатації радіоелектронних систем. Харків: ХНУПС, 2018. 268 с.
4. Сакович Л.М., Бобро Р.А. Выбор параметров и последовательности их измерения при техническом обслуживании средств связи по состоянию. Зв’язок, 2006, № 3. С. 54-56
5. Ксёэнз С.П., Волынский А.А., Климентов В.И. Теоретические и прикладные задачи диагностирования средств связи и автоматизации. Ленинград: ВАС, 1990. 336 с.
6. Ксёэнз С.П., Полтаржизкий М.И., Алексеев С.П., Минеев В.В. Борьба с диагностическими ошибками при техническом обслуживании и ремонте систем управления связи и навигации. Санкт-Петербург: ВАС, 2010, 240 с.
7. Кононов В.Б., Водолашко О.В., Коваль О.В. Основи експлуатації засобів вимірювальної техніки військового призначення в умовах проведення АТО. Харків: ХНУПС, 2017, 288 с.
8. Volodymyr Kononov, Yevhen Ryzhov, Lev Sakovych. Dependence of parameters of repair of military communication means on the quality of metrological support. *Advanced Information Systems*. 2017, Vol. 2, № 1, P. 91-95. DOI: <http://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.17>
9. Sakovych L., Ryzhov Ye, Sobolev A. Method of time distribution for repair of radio electronic means with multiple defects. *Military Technical Collection*. Львів: НАСВ, 2019, № 21. С. 72-77.
10. Рижов Є.В., Сакович Л.М. Оцінка впливу метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки на показники ремонтпридатності військової техніки зв’язку. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України, 2018. № 2 (18). С. 58-61. DOI: [http://doi.org/10.34169/2414-0651.2018.2\(18\).58-61](http://doi.org/10.34169/2414-0651.2018.2(18).58-61).
11. Рижов Є.В., Сакович Л.М. Метод визначення послідовності перевірки параметрів під час технічного обслуговування військової техніки зв’язку за станом. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України, 2017. № 4 (16). С. 70-72. DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.4\(16\).70-72](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.4(16).70-72).
12. Гнаток С.Є., Сакович Л.М., Мирошніченко Ю.В. Моделювання порядку перевірки параметрів при технічному обслуговуванні за станом радіоелектронних засобів. Електронне моделювання. Т. 42, № 5. 2020. С. 120-128.

REFERENCES

1. (2014), *Law of Ukraine “On Metrology and Metrological Activity”* of June 5, 2014, No. 1314-VII.
2. Barzilovich, E.Yu. (1982), *Models of maintenance of complex systems*, Vysshaya Shkola, Moscow, 231 p.
3. Vasilishin, V.I., Zhenzhera, S.V., Chechuy, O.V. and Glushko, A.P. (2018), *Fundamentals of the theory of reliability and operation of electronic systems*, KhNUPS, Kharkiv, 268 p.
4. Sakovich, L.M. and Bobro, R.A. (2006), “The choice of parameters and the sequence of their measurement during the technical maintenance of communication facilities by condition,” *Zvyazok*, No. 3, pp. 54-56.
5. Ksenz, S.P., Volynsky, A.A. and Klimentov, V.I. (1990), *Theoretical and Applied Problems of Diagnostics of Communication and Automation Means*, VAS, Leningrad, 336 p.
6. Ksenz, S.P., Poltarzhitsky, M.I., Alekseev, S.P. and Mineev, V.V. (2010), *Fighting Diagnostic Errors in the Maintenance and Repair of Communication and Navigation Control Systems*, VAS, St. Petersburg, 240 p.
7. Kononov, V.B., Vodolazhko, O.V. and Koval, O.V. (2017), *Fundamentals of operation of measuring equipment for military purposes in the conditions of anti-terrorist operation*, KhNUPS, Kharkiv, 288 p.
8. Kononov, V., Ryzhov, Ye and Sakovych, L. (2017), “Dependence of parameters of repair of military communication means on the quality of metrological support”, *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 91-95, DOI: <http://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.17>.
9. Sakovych, L., Ryzhov, Ye and Sobolev, A. (2019), “Method of time distribution for repair of radio electronic means wish multiple defects”, *Military Technical Collection*, No. 21, pp. 72-77.
10. Ryzhov, EV and Sakovich, L.M. (2018), “Assessment of the impact of metrological reliability of measuring equipment on maintainability indicators”, *Weapons and Military Equipment*, No. 2 (18), pp. 58-61, DOI: [http://doi.org/10.34169/2414-0651.2018.2\(18\).58-61](http://doi.org/10.34169/2414-0651.2018.2(18).58-61)
11. Ryzhov, EV and Sakovich, L.M. (2017), “Method of determining the sequence of checking the parameters during the maintenance”, *Weapons and Military Equipment*, No. 4 (16), pp. 70-72. DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.4\(16\).70-72](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.4(16).70-72).
12. Hnatyuk, S.E., Sakovich, L.M. and Miroshnichenko, Yu.V. (2020), “Modeling of the procedure for checking the parameters for maintenance of electronic devices”, *Electronic modeling*, vol. 42, no. 5, pp. 120-128.

Надійшла (received) 22.01.2021

Прийнята до друку (accepted for publication) 14.04.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Сакович Лев Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “КПІ ім. І. Сікорського”, Київ, Україна;

Lev Sakovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department, Institute of Specialized Communication and Information Security, NTUU “Igor Sikorsky KPI”, Kyiv, Ukraine;

e-mail: lev@sakovich.com.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8257-7086>.

Криховецький Георгій Яремович – кандидат технічних наук, ст. наук. співр., завідувач кафедри, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “КПІ ім. І. Сікорського”, Київ, Україна;

Heorhii Krykhovetskyi – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Department, Institute of Specialized Communication and Information Security, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky KPI”, Kyiv, Ukraine;

e-mail: kgeorg@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1771-6211>.

Міхін Олександр Володимирович – старший викладач кафедри, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “КПІ ім. І. Сікорського”, Київ, Україна;

Oleksandr Mikhin – Senior Lecturer of the Department, Institute of Specialized Communication and Information Security, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky KPI”, Kyiv, Ukraine;

e-mail: aleksandr.mihin@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9105-7616>.

Мирошніченко Юрій Володимирович – аспірант, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “КПІ ім. І. Сікорського”, Київ, Україна;

Iurii Myroshnychenko – postgraduate student, Institute of Specialized Communication and Information Security, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky KPI”, Kyiv, Ukraine;

e-mail: miroshnychenko_yuriy@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8603-9429>.

Оценка влияния метрологического и диагностического обеспечения на техническое обслуживание по состоянию средств связи

Л. Н. Сакович, Г. Я. Криховецкий, А. В. Михин, Ю. В. Мирошніченко

Аннотация. Цель статьи - количественная оценка влияния качества метрологического и диагностического обеспечения на формирование последовательности и ограничение количества проверок при техническом обслуживании по состоянию сложных радиоэлектронных комплексов, включая современные средства связи с цифровой обработкой информации. В результате анализа существующей системы технического обслуживания установлено преимущества обслуживания изделий по состоянию. При этом для определения последовательности проверок не в полной мере учитывают свойства метрологического и диагностического обеспечения. **Результаты исследования.** В статье впервые рассмотрено и получено количественную оценку влияния метрологического и диагностического обеспечения на показатели качества технического обслуживания средств связи. Показано, что наибольшее влияние на время выполнения технического обслуживания и вероятность определения при этом технического состояния оказывает диагностическое обеспечение работ с использованием современного метрологического обеспечения. Также показано, что на значение показателей качества технического обслуживания существенно влияют подготовка специалистов и технологическое оснащение ремонтного органа, умения исполнителей в полном объеме использовать возможности современных средств измерительной техники. **Вывод.** Полученные результаты целесообразно использовать при совершенствовании существующих или создании новых инструкций технического обслуживания по состоянию перспективных средств связи либо других сложных изделий радиоэлектронных систем.

Ключевые слова: средства связи; метрологическое и диагностическое обеспечение; техническое обслуживание по состоянию.

Estimation of influence of the metrology and diagnostic providing on technical service on the state communication means

Lev Sakovych, Heorhii Krykhovetskyi, Oleksandr Mikhin, Iurii Myroshnychenko

Abstract. The purpose of the article is to quantify the impact of the quality of metrological and diagnostic software on the formation of the sequence and limit the number of inspections during maintenance of complex electronic systems, including modern means of communication with digital information processing. As a result of the analysis of the existing system of maintenance the advantages of service of products on a condition are established. In this case, to determine the sequence of inspections do not fully take into account the properties of metrological and diagnostic software. **Results of the research.** In the article the quantitative estimation of influence of the metrology and diagnostic providing is first considered and got on the indexes of quality of technical maintenance of communication means. It is shown that most influence in a time of implementation of technical service and probability of determination here of the technical state render the diagnostic providing of works with the use of the modern metrology providing. It is also shown that on the value of indexes of quality of technical service preparation of specialists and technological equipment of repair organ influence substantially, abilities of performers in full to use possibilities of modern facilities of measuring technique. **Conclusion.** The got results it is expedient to draw on at the improvement of existing or creation of new instructions of technical service on the state perspective communication or other difficult wares of the radio electronic systems means.

Keywords: communication means; metrology and diagnostic providing; technical service on the state.

Intelligent information systems

UDC 621.396.6

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.18>

Serhii Olizarenko, Viacheslav Radchenko

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

METHOD FOR DETERMINING THE SEMANTIC SIMILARITY OF ARBITRARY LENGTH TEXTS USING THE TRANSFORMERS MODELS

Abstract. The paper considers the results of a method development for determining the semantic similarity of arbitrary length texts based on their vector representations. These vector representations are obtained via multilingual Transformers model usage, and direct problem of determining semantic similarity of arbitrary length texts is considered as the text sequence pairs classification problem using Transformers model. Comparative analysis of the most optimal Transformers model for solving such class of problems was performed. Considered in this case main stages of the method are: Transformers model fine-tuning stage in the framework of pretrained model second problem (sentence prediction), also selection and implementation stage of the summarizing method for text sequence more than 512 (1024) tokens long to solve the problem of determining the semantic similarity for arbitrary length texts.

Keywords: text; arbitrary length; semantic similarity; vector representation; Transformer model; fine-tuning.

Introduction

One promising approach for solving the problem of finding semantic similarity in text analysis is an approach based on using pretrained Transformers models in the Deep Learning methodology framework [1]. In this paper, following Transformers-based models are researched: the BERT model (Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding) for 104 languages [2]; DistilBERT model for 104 languages, which is a lightweight version of BERT that works faster by 60% and retains more than 95% BERT characteristics, measured with GLUE test (General Language Understanding Evaluation) [3]; XML model for 100 languages [4]. One of the limitations of all presented models is the tokenized text input sequence length – no more than 512 (1024) tokens.

The most common approach for solving semantic similarity determination problem of arbitrary length texts using Transformers model is an approach based on sliding window arbitrary length vector representation with subsequent formation and similarity degree determination of the received compressed vector representations. This study proposes the problem solution implementation of multilingual texts semantic similarity determination using pretrained multilingual Transformers model second problem (sentence prediction problem).

The main approaches for solving directly the problem of overcoming the input sequence length are approaches based on truncation methods (selection of the first or last sequence fragments 512 (1024) tokens long, combining first and last sequence fragment, but no more than 512 (1024) tokens in total) or hierarchical methods (for example, with combining latent states of the all fragments from the sequence) [5]. However, application of given approaches can lead to the contextual dependency loss of most significant words (phrases and sentences, respectively) in text sequences, which in its own turn may drastically affect semantic similarity determination quality of analyzed texts. Thus,

there is a Transformers model application problem for the texts longer than 512 (1024) tokens with provisioning of contextual dependency maximum preservation for most significant words in text sequences with the goal to effectively determine semantic similarity of arbitrary length texts. Given basic summarizing approach, extractive and abstract generalization approaches are analyzed in the paper.

Literature analysis. In this section papers are considered which have various research results presented regarding Transformers-based models' usage for solving semantic similarity determination problem of texts. So, in the papers (S. Olizarenko, V. Argunov, 2019) news content semantic similarity determination possibilities are researched with the usage of pretrained multilingual BERT model first problem (word masking problem) [1]. In the paper (Yang et al., 2019) [6] multilingual universal sentence encoder for semantic retrieval is considered for 16 languages in the sentence embedding model family of universal sentence encoder (USE) (Cer et al., 2018) [7]. Given models represent CNN architecture implementation (Kim, 2014) and Transformer (Vaswani et al., 2017) [8, 9]. In paper (Lee, 2019) multilingual similarity search implementation is proposed with LTSM bidirectional coder usage and preliminary preparation based on LASER (Language-Agnostic SEntence Representations) [10, 11]. In paper (Chi Sun et al., 2019) experiment results are provided regarding various BERT fine-tuning methods for text classification problems, including ones in the text semantic similarity determination context [5]. The publication (Nils Reimers et al., 2019) presents Sentence-BERT (SBERT) model, which is a modification of pretrained BERT network, that uses conjoined and triplet network structures in order to obtain semantically meaningful vector sentence representations to be compared using similarity cosine [12]. In the paper (Manish Patel, 2019) semantic-oriented search system is developed, which uses BERT inclosures and additional neural network for similarity estimate finding with subsequent document ranking, in order from most meaningful to least meaningful document [13]. In

the paper (Han Xiao, 2019) search system is developed, which uses BERT inclosures and cosine similarity to compute query and document similarity estimate [14]. At the same time, efficient processing questions of arbitrary length texts in these works were not considered.

Purpose of paper. Development of a method, essence of which is the preliminary generalization (automatic summarization) of the arbitrary length compared texts based on machine learning method and subsequent direct determination of their semantic similarity within the framework of the text sequence pairs classification problem solving (the predicting sentences problem) using a pretrained and fine-tuned Transformers model.

Main part

In this paper the semantic similarity determination problem of arbitrary length texts is considered as the problem of text sequence pairs classification problem. In accordance with given problem statement, method development procedure for semantic similarity determination of arbitrary length texts using Transformers models is presented, in the form of the following main stages:

- 1) Software module architecture definition for semantic similarity determination of arbitrary length texts;
- 2) Basic summarizing method of text sequence more than 512 (1024) tokens long for semantic similarity determination of arbitrary length texts problem solving;

3) Application possibilities analysis of various Transformers model types (BERT, DistilBERT and XML) for texts semantic similarity determination.

4) Transformers model fine-tuning (BERT, DistilBERT and XML) to solve the text sequence pairs classification problem;

5) Tuning results analysis and basic Transformers model choice for semantic similarity determination problem solution of arbitrary length texts based on their summarization results.

Schematically semantic similarity determination of arbitrary length texts software module is presented in Fig. 1. In accordance to given schema, software module comprises two main blocks:

- 1) Summarization block of text sequence no more than 254 tokens long (for considered in the paper BERT, DistilBERT and XML models);
- 2) Fine-tuned multilingual Transformer model for sequence pairs classification problems.

Generalization is the task of reducing the text to a shorter version, decreasing the size of the original text while retaining the key information elements and content meaning. The main summarization problem in this study was to generalize a text sequence of no more than 254 tokens long (for the BERT, DistilBERT and XML models considered in the paper) for subsequent representation as single sequence from input pair for corresponding multilingual model. Several models of summarizers were analyzed, among which following were selected:



Fig. 1. Software module schematic representation for semantic similarity determination of arbitrary length texts

1) As extractive models – LSA, KLS, LexRankS and TextRank;

2) As abstract models – based on Transformers T5, mT5 and Pegasus, available in the Hugging Face library for TensorFlow [15].

In particular, mT5 model is a multilingual version of the English T5 model, trained on multilingual dataset.

With the help of this multilingual model actually the abstract summarization (generalization) problem is solved for a multilingual text (at the moment the main limitation is the size of the input text).

Models were evaluated using English documents and their performance was compared by their ROUGE score. Based on the results, a decision was made to use

the latent semantic analysis (LSA) model as an extractive model and the mT5 model (a massively multilingual pretrained text-to-text transformer).

In this paper three Transformers models are considered (BERT, DistilBERT and XML) for the semantic similarity determination of texts, available in Hugging Face library for TensorFlow [15]. Multilingual model BERT (trainable parameters 177,854,978) for 104 languages is a bidirectional converter, preliminarily trained using the combination of target simulation utilizing masked language modeling (MLM) and next sentence prediction (NSP) [2]. While training NSP in the BERT model, a specialized token (CLS) was used as a sequence for prediction results estimation. In given paper this token (first token in the sequence) is used to solve the classification problem of text sequence pairs for all Transformers models. Multilingual DistilBERT model (trainable parameters 135,326,210) for 104 languages is a lightweight BERT version, operating faster by 60% and retaining more than 95% of BERT performance, measured in GLUE test (General Language Understanding Evaluation) [3]. Multilingual XML model (trainable parameters 571,499,522) for 100 languages is a pretrained Transformer model using one of the following objectives [4]:

- 1) a causal language modeling (CLM) objective (next token prediction);
- 2) a masked language modeling (MLM) objective (BERT-like);
- 3) a Translation Language Modeling (TLM) object (BERT MLM extension for multiple language inputs).

Thus, XML model is not directly trained for NSP, unlike BERT and DistilBERT models. By the way, input data format for XML model, like in BERT model, ensures encoding of two different sequences in the equal input identifiers (token type IDs). At the same time input data format of DistilBERT model does not have token type IDs. That is, the given model does not indicate, which token belongs to which text sequence segment. To solve this problem, DistilBERT model segments are simply separated with the help of a special token (SEP) (same as in BERT model).

As part of the study, for the text sequence pairs classification problem Transformers model adopt final latent state s .

As the activation function of the fully connected classifier layer, a *softmax* function is used to predict the probability p towards the class label l [17]:

$$p(l|s) = \text{softmax}(W_s), \tag{1}$$

where W_s – resulting tensor of the latent state s .

Fine-tuning of Transformers models (BERT, DistilBERT, XML) for text sequence pairs classification problem solving was carried out with the MRPC dataset. Paraphrasing detection is a problem of studying two text objects and determining whether they are the same value. In the general case, for obtaining high accuracy while solving this problem, both syntactic and semantic thorough analysis of two text objects is required. Based on paraphrasing style, paraphrases can be distributed into five types [17]. In the framework of this study given the text semantic similarity determination context special meaning has fifth paraphrase type (complex paraphrase).

Fine-tuning results of multilingual Transformers models (BERT, DistilBERT, XML) are presented in the Fig. 2-4 and Table 1 [18].

Fig. 2 chart analysis shows that already at the third training epoch for all models discrepancy happens between “validate loss” and “validate accuracy” values. That is, for the given models fine-tuning process up to two training epochs is enough using corresponding dataset.

Table 1 data analysis demonstrates that the BERT model has the highest F1-score values according to the multilingual Transformers models fine-tuning results for solving the text sequence pairs classification problem using MRPC dataset. At the same time precision measure values for DistilBERT and XML models are very close.

This is in a view of the fact that XML model has 4 times more trainable parameters than DistilBERT.

Table 1 – F1-score values based on the fine-tuning results

Model		F1-score
BERT	no similar	0,82
	similar	0,92
	accuracy	0,88
DistilBERT	no similar	0,74
	similar	0,90
	accuracy	0,86
XML	no similar	0,76
	similar	0,91
	accuracy	0,86

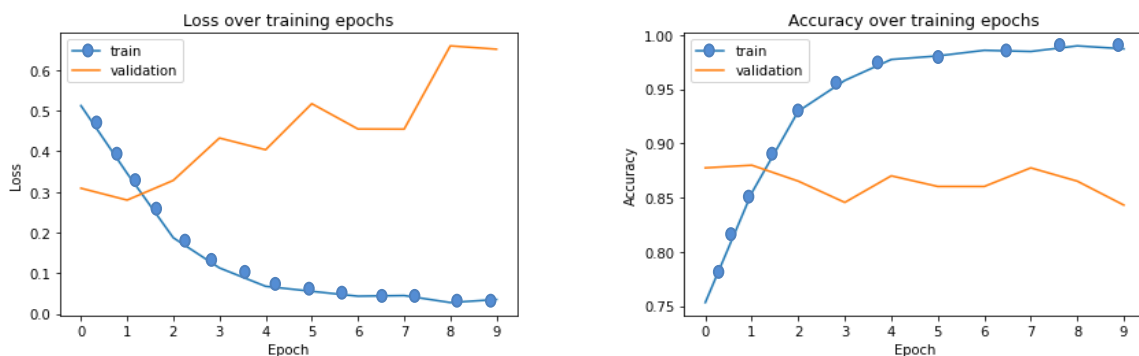


Fig. 2. Plots of error and accuracy of training for BERT

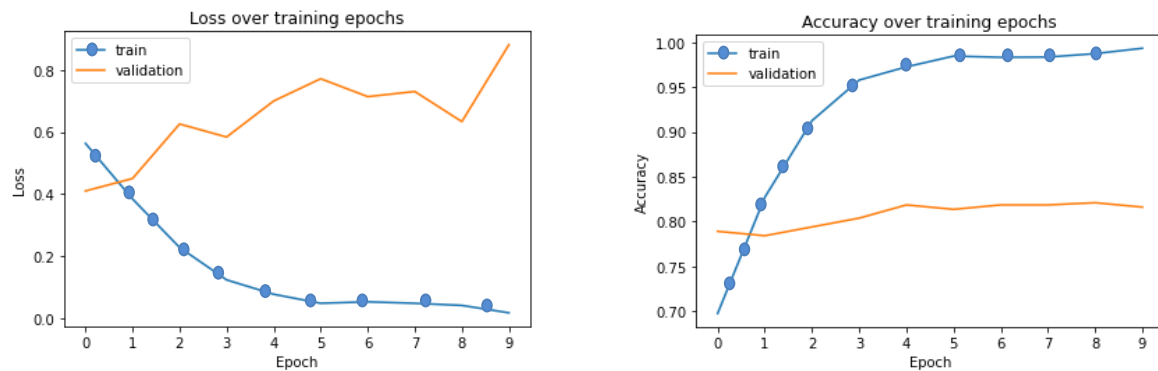


Fig. 3. Plots of error and accuracy of training for the DistilBERT model

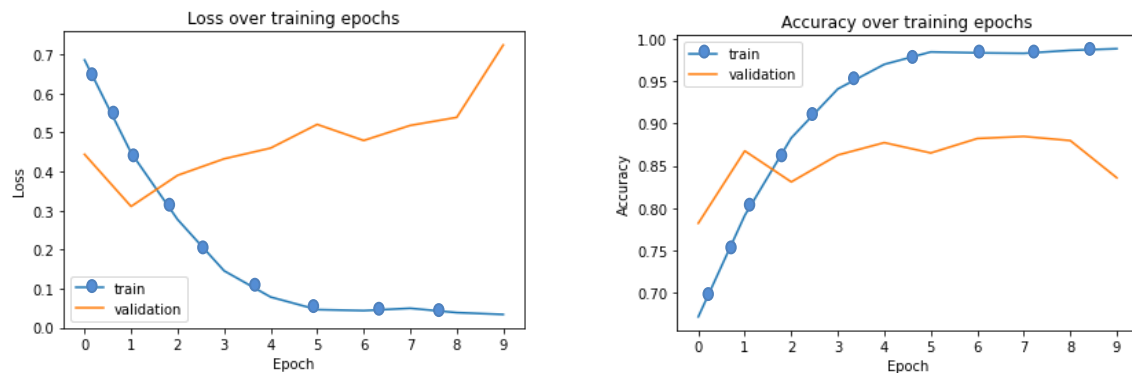


Fig. 4. Plots of error and accuracy of training for the XML model

So, when there are no hardware limitations for solving the multilingual news contents semantic similarity determination problem, the most effective way is to use multilingual BERT model. If there are restrictions, it is best to use multilingual DistilBERT model. The application of XML model for solving the given class of problems within the framework of the first approach is not very effective, since this basic model was not trained using the next sentence prediction target.

Conclusions

This paper describes a developed method of arbitrary length text semantic similarity determination based on text sequence pairs classification problem solving using Transformers model.

A feature of the given method implementation is the preliminary text processing more than 512 (1024)

tokens long with the intellectual text summarizer application and subsequent usage of fine-tuned Transformers model for the text sequence pairs classification problems. Latent semantic analysis (LSA) model as extractive model and mT5 model (a massively multilingual pre-trained text-to-text transformer) as abstract model were used to perform summarization tasks.

Studies have shown that BERT model usage is the most effective as classification model when there are no hardware limitations.

When there are constraints, DistilBERT model usage will be the most effective.

The benefit of the given method is, above all, the possibility to overcome input sequence restrictions while determining semantic similarity of the texts in combination with the fine-tuned pretrained Transformers model advantages utilization.

REFERENCES

1. Olizarenko, S. and Argunov, V. (2020), "On possibilities of multilingual Bert model for determining semantic similarities of the news content", *Control, navigation and communication systems*, Poltava: NU PP, No. 3(61), pp. 94-99.
2. Devlin, J., Ming-Wei Chang, Lee, Ke and Toutanova, K. (2019), *BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding*, arXiv:1810.04805v2 [cs.CL] 24 May 2019.
3. Sanh, V., Debut, L., Chaumond, J. and Wolf, T. (2020), *DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter*, arXiv:1910.01108v4 [cs.CL] 1 Mar 2020.
4. Guillaume, Lample and Alexis, Conneau (2019), *Cross-lingual Language Model Pretraining*, arXiv:1901.07291v1 [cs.CL] 22 Jan 2019.
5. Sun, C., Qiu, X., Xu, Y. and Huang X. (2020), *How to Fine-Tune BERT for Text Classification*, arXiv:1905.05583v3 [cs.CL].
6. Yang, Y., Cer, D., Ahmad, A., Guo, M., Law, J., Constant, N., Abrego, G.H., Yuan, S., Tar, C., Sung, Y., Strope, B. and Kurzweil R. (2019), *Multilingual Universal Sentence Encoder for Semantic Retrieval*, arXiv:1907.04307v1.
7. Cer, D., Yang, Y., Kong, S., Hua, N., Limtiaco, N., John, R.St., Constant, N., Guajardo-Cespedes, M., Yuan, S., Tar, C., Strope, B. and Kurzweil, R. (2018), "Universal sentence encoder for English", *Proceedings of the 2018 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: System Demonstrations*, pp. 169–174.

8. Yoon, Kim (2014), “Convolutional neural networks for sentence classification”, *Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, pp. 1746–1751.
9. Ashish, Vaswani, Noam, Shazeer, Niki, Parmar, Jakob, Uszkoreit, Llion, Jones, Aidan, Gomez, Łukasz, Kaiser, and Illia, Polosukhin (2017), “Attention is all you need”, *Proceedings of NIPS*, pp. 6000–6010.
10. (2020), *Multilingual Similarity Search Using Pretrained Bidirectional LSTM Encoder. Evaluating LASER (Language-Agnostic Sentence Representations)*, available at: <https://medium.com/the-artificial-impostor/multilingual-similarity-search-using-pretrained-bidirectional-lstm-encoder-e34fac5958b0>.
11. (2019), *Zero-shot transfer across 93 languages: Open-sourcing enhanced LASER library*, POSTED ON JAN 22, 2019 TO AI RESEARCH, available at: <https://engineering.fb.com/ai-research/laser-multilingual-sentence-embeddings>.
12. Reimers, N. and Gurevych I. (2019), *Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks*, arXiv:1908.10084v1 [cs.CL] 27 Aug 2019.
13. Patel, M. (2019), *TinySearch - Semantics-based Search Engine using Bert Embeddings*, available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1908/1908.02451.pdf>.
14. Han, X. (2020), *Bert-as-service*, available at: <https://github.com/hanxiao/bert-as-service>.
15. (2020), *State of the art Natural Language Processing for Pytorch and TensorFlow 2.0*, available at: <https://huggingface.co/transformers/index.html>.
16. Goodfellow, I., Bengio, Y. and Courville, A. (2018), *Softmax Units for Multinoulli Output Distributions. Deep Learning*, MIT Press. pp. 180–184, ISBN 978-0-26203561-3.
17. Dolan, B. and Brockett, C. (2005), “Automatically Constructing a Corpus of Sentential Paraphrases”, *Proceedings of the 3rd International Workshop on Paraphrasing (IWP 2005)*, Jeju Island, pp. 9–16.
18. Olizarenko, S. and Argunov, V. (2020), “Research on the specific features of determining the semantic similarity of arbitrary-length text content using multilingual Transformer-based models”, *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 3, pp. 94–103, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.3.13>

Received (надійшла) 12.02.2021

Accepted for publication (прийнята до друку) 12.05.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Олізаренко Сергій Анатолійович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Serhii Olizarenko – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor of the Electronic Computers Department, Kharkiv National University of Radio Electronics University, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: sergejolizarenko5@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7762-6541>.

Радченко В'ячеслав Олексійович – старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Viacheslav Radchenko – Senior Lecturer of the Electronic Computers Department, Kharkiv National University of Radio Electronics University, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: viacheslav.radchenk@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2505-1969>.

Метод визначення семантичної подібності текстів довільної довжини з використанням моделей Transformers

С. А. Олізаренко, В. О. Радченко

Анотація. В роботі розглянуті результати розробки методу визначення семантичної подібності текстів довільної довжини на основі їх векторних уявлень. При цьому векторні уявлення отримані з використанням мультимовної моделі Transformers, а безпосередньо завдання визначення семантичного подібності текстів довільної довжини розглядається як задача класифікації пар текстових послідовностей з використанням моделі Transformers. Виконано порівняльний аналіз найбільш оптимальної моделі Transformers для вирішення даного класу задач. Основними етапами методу при цьому розглядаються етап тонкої настройки моделі Transformers в рамках другого завдання переднавчальної моделі (завдання прогнозування пропозицій), а також етап вибору і реалізації методу сумаризації текстової послідовності довжиною понад 512 (1024) токенів для вирішення завдання визначення семантичного подібності текстів довільної довжини.

Ключові слова: текст; довільна довжина; семантична подібність; векторне подання; модель Transformer; тонке налагодження.

Метод определения семантического подобия текстов произвольной длины с использованием моделей Transformers

С. А. Олизаренко, В. А. Радченко

Аннотация. В работе рассмотрены результаты разработки метода определения семантического подобия текстов произвольной длины на основе их векторных представлений. При этом векторные представления получены с использованием мультязычной модели Transformers, а непосредственно задача определения семантического подобия текстов произвольной длины рассматривается как задача классификации пар текстовых последовательностей с использованием модели Transformers. Выполнен сравнительный анализ наиболее оптимальной модели Transformers для решения данного класса задач. Основными этапами метода при этом рассматриваются этап тонкой настройки модели Transformers в рамках второй задачи предобученной модели (задачи прогнозирования предложений), а также этап выбора и реализации метода суммаризации текстовой последовательности длиной более 512 (1024) токенов для решения задачи определения семантического подобия текстов произвольной длины.

Ключевые слова: текст; произвольная длина; семантическое подобие; векторное представление; модель Transformer; тонкая настройка.

Methods of information systems protection

UDC 004.056.55

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.19>

Serhii Yevseiev, Roman Korolyov, Andrii Tkachov, Anastasiya Nimchenko

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF PROCEDURES FOR MODIFYING THE CIPHER GOST 28147

Abstract. The entry of mankind into the era of high technologies, the rapid growth of computer technology contributes to the expansion of the range of electronic services. To ensure the security of confidential information, personal data, cryptographic systems of traditional cryptography (symmetric cryptosystems) and public key cryptography (asymmetric cryptosystems) are used. As a rule, the former provides security services, the latter provide key distribution. However, in the conditions of totalitarian surveillance in society by the special services of developed countries, cryptographic tabs are embedded in cryptographic algorithms, which, on the one hand, provide "quick" access for special services to confidential information, and on the other hand, allow intruders to break into the cryptosystem and obtain user data. The article proposes a modification of the well-known GOST 28147-89 algorithm, which ensures the "elimination" of possible crypto-bookmarks and an increase in crypto-resistance in the post-quantum period (the emergence of a full-scale quantum computer that allows hacking modern symmetric and asymmetric cryptosystems based on Grover and Shor algorithms). It is proposed to use the procedures for modifying the block-symmetric encryption algorithm (BSEA) GOST 28147-89 (2009, 2015) in OFB mode, which will make it possible to form a pseudo-random sequence based on dynamic changes in the S-box, and provide the required level of security.

Keywords: block-symmetric cipher; stream cipher; GOST 28147-89; DSTU 28147-2009.

Problem statement

The entry of mankind into the era of high technologies, 4.0 Industrialization allowed the rapid growth of the computing capabilities of the world community, which made it possible in 2015 to develop and implement not only 1 billion Internet things that replenished cyberspace, but also practically made it possible to realize a full-scale quantum computer. A quantum computer allows computing several billion times faster, expanding the range of services in almost all areas of life. This circumstance is an unconditional positive factor affecting the innovative nature of the development of the real sector of the economy, healthcare, services, leisure and, of course, education. However, along with this, this trend is increasingly revealing the acuteness of the problems, the negative consequences of informatization. To the greatest extent, these problems are associated with the possibilities of unauthorized access to information resources, critical infrastructure facilities belonging to other individuals, business entities, the banking sector, and other states. This is directly related to the need to ensure not only national, but also state security [1].

Analysis of recent research and publications

The widespread use of cloud technologies, means of remote connection from mobile and remote stationary devices through general-purpose networks lead to the "disappearance of the perimeter" of critical systems and a significant complication of their protection. All this leads to the need to implement security at least of the security loop of business processes that ensure the continuity of production and form the profits of companies (organizations, etc.). A prerequisite for this is the use of cryptographic means of protection in modern information, communication and cyber-physical systems. Symmetric block ciphers are one of the most common

cryptographic systems that provide the basic security services of modern ISO/OSI model protocols and cyberspace. In addition to providing confidentiality and integrity services transmitted over the network or stored locally, BSEA are used as a constructive element of other primitives (hashing functions, message authentication codes, pseudo-random sequence generators, etc.) But when launching a quantum cryptanalysis algorithm by Shore [2] and Grover [3], one can solve mathematical problems in a multi-fold manner. Such a phenomenon can lead to chaos in cyberspace, the destruction of critical infrastructure facilities, and a decrease in confidence in security services based on symmetric and asymmetric cryptography. The emergence of a full-scale quantum computer practically infinitely expands the range of threats and modification of attacks, the emergence of new targeted attacks with characteristics of synergy and hybridity. A detailed description of the stability of symmetric systems against quantum cryptanalysis is given in Table 1 and in article [4]. From the table 1 shows that the stability of symmetric ciphers in the attack using a quantum algorithm is significantly reduced. This means that GOST 28147 can be completely compromised and it will not be possible to consider it stable, its stability will be equal to 2^{256} . Even with AES, it is desirable to use a key of 256 bits. That is, in general, Grover's algorithm, although it reduces the stability of modern symmetric cryptosystems, but still requires a subexponentially number of quantum gates in contrast to the Shore algorithm.

To ensure security in the post-quantum period, NIST U.S. specialists in February 2019 announced a competition for post-quantum cryptography algorithms. Definitions of practical durability set by NIST requirements provide five levels of durability [5, 6]:

- 1) definition of a key of the 128-bit block cipher;
- 2) search for a collision of a 256-bit hash function;
- 3) collision search for 384-bit hash function;

- 4) determination of the key of the 256-bit block cipher;
- 5) 384-bit block cipher key definition.

Table 1 – Strength of standard block-symmetric encryption algorithms against quantum cryptanalysis

Crypto-system	Block / key size, (bits)	The amount of memory required for the attack, (bits)	Resistance when attacking:	
			message	key
AES-128	128/128	128/128	2^{64}	2^{64}
AES-256	128/256	128/256	2^{64}	2^{128}
DES	64/56	64/56	2^{32}	2^{28}
GOST-28147	64/256	64/256	2^{64}	2^{256}
Kalina-128	128/128	128/128	2^{64}	2^{64}
Kalina-512	512/512	512/512	2^{256}	2^{256}

Thus, the modification of BSEA, which are the standards of symmetric encryption, and are used in information and switching systems of critical infrastructure objects is an urgent task in the post-quantum period.

The purpose of the article is to develop procedures for improving the stream encryption algorithm based on the block-symmetric encryption algorithm GOST 28147-89 through the use of dynamically changing nonlinear transformations (S-boxes).

The main objectives of the study:

- analysis of the basic procedures of the block cipher algorithm GOST 28147-89;
- development of procedures for improving the method of forming a pseudo-random sequence based on GOST 28147-89.

Analysis of the block cipher algorithm GOST 28147-89

GOST 28147-89, adopted in 1990, was a standard establishing a unified cryptographic transformation algorithm for information processing systems in networks of electronic computers, which determined the rules for data encryption and the development of an imitation insert. The cryptographic transformation algorithm was intended for hardware or software implementation, met the cryptographic requirements and, according to its capabilities, did not impose restrictions on the degree of secrecy of the protected information [5].

One of the operating modes of GOST 28147-89 was the gamming mode, the structural diagram of which is shown in Fig. 1.

The data is displayed on 64-bit blocks, encrypted in the modulo 2 mode in the CM₅ summator with the cipher scale, as it is rotated in blocks of 64 bit. The initial filling of drives N₁, N₂ (sync message S) is encrypted in the simple replacement mode in accordance with 256 bits of the key are entered into the RAM. A 64-bit binary sequence S = (S₁, S₂, ... S₆₄) is entered into the drives N₁, N₂, which is the initial filling of these drives for the subsequent generation of M blocks of the cipher gamma.

The encryption algorithm for a 64-bit block of open data in the simple replace mode consists of 32

cycles. In the first cycle, the initial filling of the accumulator N₁ is summed modulo 2³² in the adder CM₁ with the filling of the accumulator X₀, while the filling of the accumulator N₁ is preserved.

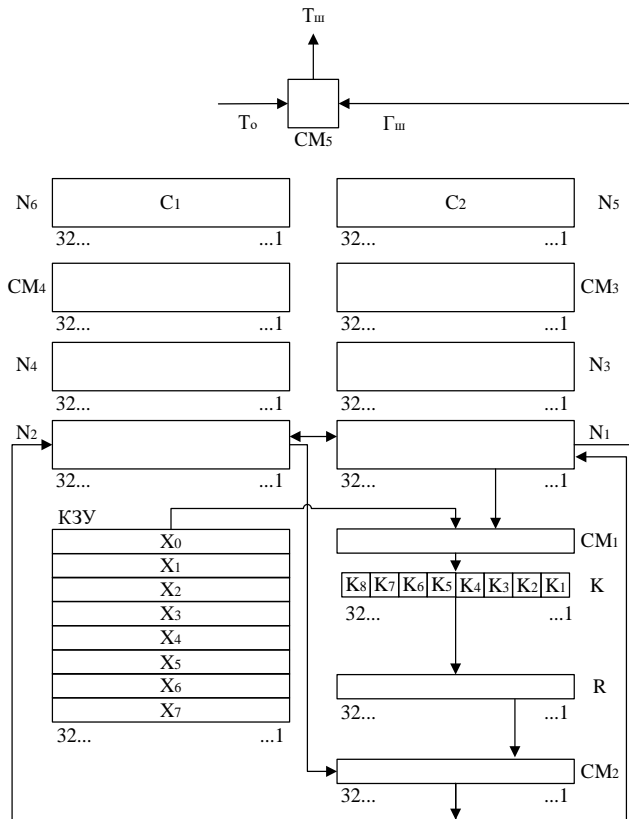


Fig. 1. Gamming mode GOST 28147-89

The result of the summation is converted in the substitution block K and the resulting vector is fed to the input of the register R, where it is cyclically shifted by eleven steps towards the higher bits. The result of the shift is summed bitwise modulo 2 in the CM₂ adder with 32-bit filling of the N₂ drive. The result obtained in CM₂ is written to N₁, while the old filling N₁ is overwritten in N₂. The result of encryption is written to 32-bit drives N₃ and N₄, so that filling N₁ is overwritten in N₃, and filling N₂ is overwritten in N₄. The filling of the N₄ drive is summed modulo (2³²-1) in the CM₄ adder with a 32-bit constant C₁ from the N₆ drive, the result is written to N₄. The filling of the drive N₃ is summed modulo 232 in the CM₃ adder with a 32-bit constant C₂ from the drive N₅, the result is written to N₃. The filling N₃ is overwritten in N₁, and the filling N₄ is overwritten in N₂. The filling of N₁ and N₂ is encrypted in simple replace mode. The filling N₁, N₂ obtained as a result of encryption forms the first 64-bit block of the cipher gamut, which is summed bitwise modulo 2 in the adder CM₅ with the first 64-bit block of open data. This scheme uses the static substitution block K, which consists of 8 static substitution blocks [7].

The article proposes to use a schema with dynamically changing substitution blocks. The block diagram is shown in Fig. 2. This diagram consists of the following steps:

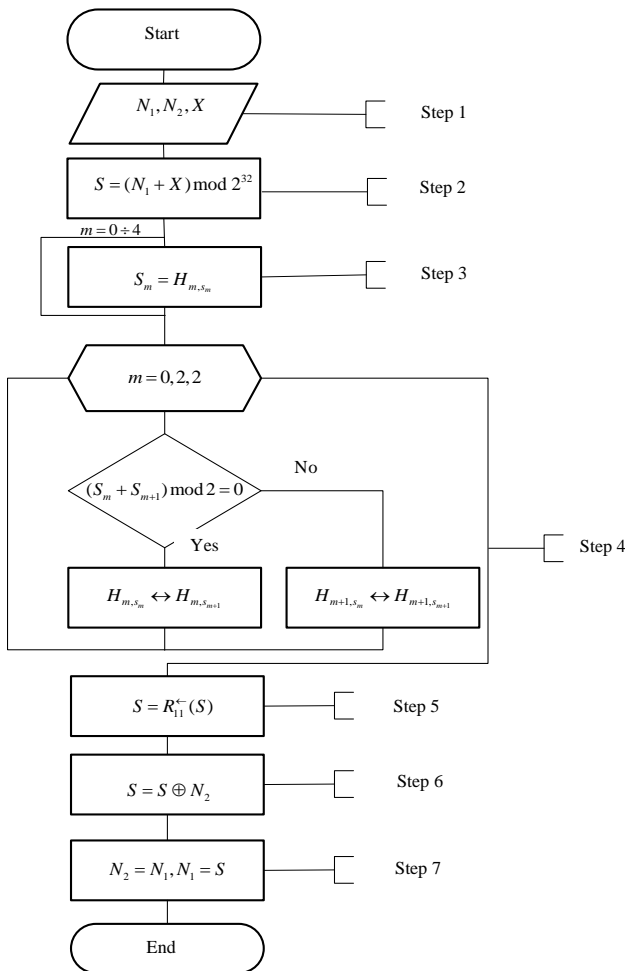


Fig. 2. Gamming mode of the improved GOST 28147-89

Step 1. Input of initial data for the main step of crypto-transformation N - 64-bit block of input data is converted into two 32-bit integers (low (N_1) and high (N_2) parts);

Step 2. Addition with a key. The lower part of the transformed block is added modulo with the key element used in the step.

Step 3. Block replacement. The 32-bit value obtained in the previous step is interpreted as an array of four 8-bit code blocks: $S_m = (S_0, S_1, S_2, \dots, S_{255})$.

Further, the value of each of the four blocks is replaced with a new one, which is selected according to the substitution table as follows: the value of the S_i block is changed to the S_i -th element in order (numbering from zero) of the i -th substitution node (i.e., the i -th row of the substitution table, numbering also from zero). In other words, an element from the substitution table with a row number equal to the number of the replaced block and a column number equal to the value of the replaced block as an 8-bit non-negative integer is selected as a replacement for the block value.

Step 4. Dynamically change the table of substitutions as follows: if the sum $S_0 + S_1$ is an even number, then the values of $S_0 \leftrightarrow S_1$ of table H_0 are swapped, otherwise $S_0 \leftrightarrow S_1$ of table H_1 . If the sum $S_2 + S_3$ is an even number, then the values of $S_2 \leftrightarrow S_3$ of table H_2 are interchanged, otherwise $S_2 \leftrightarrow S_3$ of table H_3 .

Step 5. Cyclic shift 11 bits to the left.
Step 6. Bitwise addition: the value obtained in step 3 is added bitwise modulo 2 with the upper half of the converted block.

Step 7. Shift along the chain: the lower part of the converted block is shifted to the place of the older one, and the result of the previous step is placed in its place.

The use of such a transformation makes it possible to dynamically (based on a simple pseudo-random sequence generator) form the OFB mode and provide the required level of cryptographic strength.

The structural diagram of a well-developed algorithm can be described by a multi-round diagram, as shown in Fig. 3.

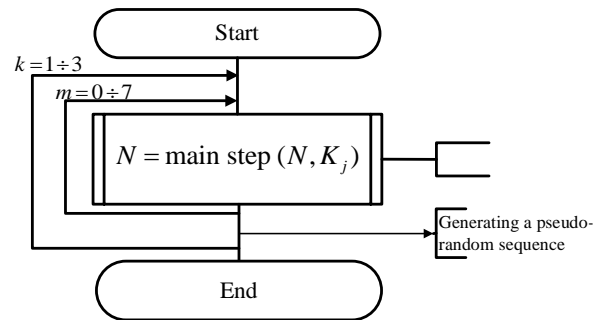


Fig. 3. Scheme of pseudo-random sequence formation

The article proposes three procedures for modifying BSEA GOST 28147. The proposed modes for the formation of pseudo-droplet sequencing at $K=1, K=2, K=3$, allow to increase the length of the key sequence and provide the required level of creep resistance in the post-quantum period.

To assess the cryptographic strength, it is proposed to use the NIST-STS822 package, which allows implementing 189 tests based on 19 methods for checking the information sequence for randomness. During the test, a 108-bit sequence is tested, taking into account the errors of the first and second kind. Carrying out an experimental improvement of the statistical safety of the proprietary well-developed algorithm according to the NIST STS methodology. The test results are presented in the statistical portraits in Fig. 4 – 6. The analysis of the data will show that the statistical portraits of the well-developed algorithm do not compromise their powers to the most beautiful generators.

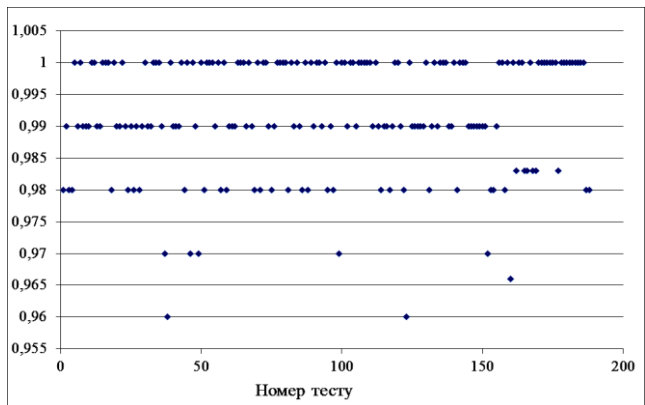


Fig. 4. Statistical portrait of the advanced algorithm at $K = 1$

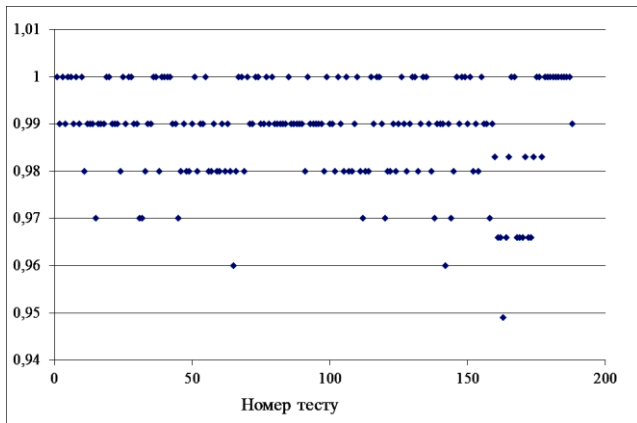


Fig. 5. Statistical portrait of the advanced algorithm at K = 2

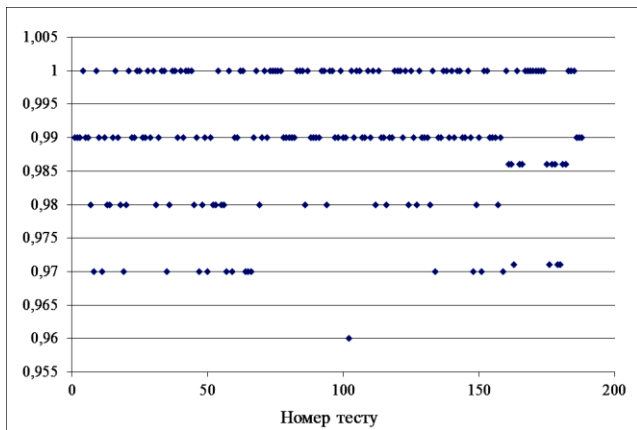


Fig. 6. Statistical portrait of the advanced algorithm at K = 3

The main part of the tests was passed at a very high level, close to 1.

Analysis of the data presented shows that the statistical portraits of the modified block-symmetric encryption algorithm GOST 28147 in OFB mode are not inferior in their properties to the best-known generators. Most of the tests passed with a very high probability, close to 1.

The final test results according to the NIST STS method are summarized in Table 2, which shows the number (share) of tests in which testing was passed with a probability of $\geq 0,99$; $\geq 0,96$ and $< 0,96$.

Analysis of the test results, summarized in table 2. shows that the proposed modification procedures BSEA GOST-28147-89 (2009, 2015) have improved statistical safety indicators (at K = 1).

This approach provides the level of cryptographic strength required in the post-quantum period. They have one of the largest number (proportion) of tests that passed the most stringent criterion with a probability $\geq 0,99$ and

are not inferior to such well-known generators as the BBS counter mode.

Table 2 – Results of comparative studies of the statistical safety of the modified and some well-known pseudo-random number generators

№	Generator	Number of tests in which the test passed the criterion		
		M \geq 99%	M \geq 96%	M < 96%
1	G using SHA-1	122(65%)	188 (99,5%)	1 (0,5%)
2	Linear Congruential	139 (74%)	189 (100%)	–
3	Micali-Schnorr	130 (69%)	189 (100%)	–
4	Quadratic Congruential	124 (66%)	181 (96%)	8 (4%)
5	G using DES	142 (75%)	188 (99,5%)	1 (0,5%)
6	ANSI X9.17 (3-DES)	121 (64%)	187 (98%)	4 (2%)
7	Blum-Blum-Shub	134 (71%)	189 (100%)	–
8	FIPS 197	126 (67%)	189 (100%)	–
9	GOST 28147 at K=1	145(77%)	189 (100%)	–
10	ГОСТ 28147 at K=2	129(68%)	188 (99,5%)	1 (0,5%)
11	ГОСТ 28147 at K=3	136(72%)	189 (100%)	–

Conclusions

The analysis of the requirements for post-quantum cryptography algorithms puts forward a significant increase in the length of the key sequence (2-3 times), which affects the energy consumption and speed of cryptocurrencies while reducing the safe time to use the key sequence by 30%.

Analysis of the proposed modification procedures algorithm BSEA GOST 28147-89 (2009, 2015) in the mode of quenching has improved statistical safety. It has one of the largest share of tests that passed the most stringent criteria with a probability of 0.99 and is not inferior to known generators as the BBS generator, Micali-Schnorr in counter mode. This provides the required level of stability, the rate of transformation in the post-quantum period.

REFERENCES

1. Rybalsky, O.V., Khakhanovsky, V.G. and Kudinov, V.A. (2012), *Fundamentals of information security and technical protection of information*, National Academy of Internal Affairs, Kyiv, 104 p.
2. Shor, P.W. (1997), "Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer", *S IAM J. Comput.*, 26 (5), pp. 1484–1509.
3. Grover, L.K. (1996), "A fast quantum mechanics algorithm for database search", *Proceeding of the 28th ACM Symposium on Theory of Computation*, ACM Press, New York, pp. 212–219
4. Gorbenko, Y.I. and Ganzya, R.S. (2014), "Analysis of the stability of popular cryptosystems against quantum cryptanalysis based on Grover's algorithm", *Information protection*, Vol. 16, No. 2, pp. 106–112.

5. Evseev, S.P., Rzaev, H.N. and Сыганенко, A.S. (2016), "Analyze programnoj realizacyyu prjamogo y obratnogo preobrazovaniya po metodu nedvoychnogo ravnovesnogo kodyrovaniya", *Bezpeka informacii*, 22#2, pp. 196 - 203.
6. (2020), *NIST announced start of post-quantum cryptography standardization*, URL: <https://habr.com/ru/post/512410/>.
7. (1989), GOST 28147-89, URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294826/4294826698931.pdf>

Надійшла (received) 12.02.2021

Прийнята до друку (accepted for publication) 21.04.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

- Євсєєв Сергій Петрович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Харківський національний економічний університет ім. Семена Кузнеця, Харків, Україна;
Serhii Yevseev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Cybersecurity and Information Technology, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Serhii.Yevseev@hneu.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1647-6444>.
- Корольов Роман Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Харківський національний економічний університет ім. Семена Кузнеця, Харків, Україна;
Roman Korolyov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Cybersecurity and Information Technology, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: korolevrv01@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7948-5914>.
- Ткачов Андрій Михайлович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Харківський національний економічний університет ім. Семена Кузнеця, Харків, Україна;
Andrii Tkachov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Cybersecurity and Information Technology, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: andrew.tkachov@hneu.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1428-0173>.
- Німченко Анастасія Євгенівна** – студентка кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Харківський національний економічний університет ім. Семена Кузнеця, Харків, Україна;
Anastasia Nimchenko – student of the Department of Cybersecurity and Information Technology, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: anastasiya.nimchenko@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8098-9597>.

Розробка процедур модифікації шифру ГОСТ 28147

С. П. Євсєєв, Р. В. Корольов, А. М. Ткачов, А. Є. Німченко

Анотація. Вступ людства в еру високих технологій, бурхливе зростання обчислювальної техніки сприяє розширенню спектра електронних послуг. Для забезпечення безпеки конфіденційної інформації, персональних даних використовуються криптографічні системи традиційної криптографії (симетричні криптосистеми) і криптографії з відкритим ключем (несиметричні криптосистеми). Як правило, перші забезпечують послуги безпеки, другі - розподіл ключів. Однак в умовах тоталітарної стеження в суспільстві з боку спец служб розвинених держав в криптографічних алгоритмах "вбудовуються" криптографічні закладки, які з одного боку забезпечують "швидкий" доступ спецслужб до конфіденційної інформації, з іншого боку дозволяють зловмисникам зламувати криптосистему і отримувати дані користувачів. У статті пропонується модифікація відомого алгоритму ГОСТ 28147-89, яка забезпечує "усунення" можливих криптозакладок і підвищення криптостійкості в умовах постквантового періоду (поява повномасштабного квантового комп'ютера, який дозволяє зламати на основі алгоритмів Гровера і Шора сучасні симетричні і несиметричні криптосистеми). Пропонується використовувати процедури модифікації блочно-симетричного алгоритму шифрування (БСШ) ГОСТ 28147-89 (2009, 2015) в режимі OFB, що дозволить формувати псевдовипадкову послідовність на основі динамічного зміни S-box, і забезпечити необхідний рівень стійкості.

Ключові слова: блочно-симетричний шифр; потоковий шифр; ГОСТ 28147-89; ДСТУ 28147-2009.

Разработка процедур модификации шифра ГОСТ 28147

С. П. Евсеев, Р. В. Королев, А. М. Ткачев, А. Е. Нимченко

Аннотация. Вступление человечества в эру высоких технологий, бурный рост вычислительной техники способствует расширению спектра электронных услуг. Для обеспечения безопасности конфиденциальной информации, персональных данных используются криптографические системы традиционной криптографии (симметричные криптосистемы) и криптографии с открытым ключом (несимметричные криптосистемы). Как правило, первые обеспечивают услуги безопасности, вторые – распределение ключей. Однако в условиях тоталитарной слежки в обществе со стороны спец служб развитых государств в криптографических алгоритмах "встраиваются" криптографические закладки, которые с одной стороны обеспечивают "быстрый" доступ спецслужб к конфиденциальной информации, с другой стороны позволяют злоумышленникам взламывать криптосистему и получать данные пользователей. В статье предлагается модификация известного алгоритма ГОСТ 28147-89, которая обеспечивает "устранение" возможных криптозакладок и повышение криптостойкости в условиях постквантового периода (появление полномасштабного квантового компьютера, который позволяет взломать на основе алгоритмов Гровера и Шора современные симметричные и несимметричные криптосистемы). Предлагается использовать процедуры модификации блочно-симетричного алгоритма шифрования (БСШ) ГОСТ 28147-89 (2009, 2015) в режиме OFB, что позволит формировать псевдослучайную последовательность на основе динамического изменения S-box, и обеспечить требуемый уровень стойкости.

Ключевые слова: блочно-симметричный шифр; поточный шифр; ГОСТ 28147-89; ДСТУ 28147-2009.

Zhang Liqiang¹, Cao Weiling¹, Jan Rabčan², Viacheslav Davydov³, Nataliia Miroshnichenko³

¹ Neijiang Normal University, Neijiang, China

² University of Žilina, Žilina, Slovakia

³ National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

ANALYSIS AND COMPARATIVE STUDIES OF SOFTWARE PENETRATION TESTING METHODS

Abstract. Information security is one of the most important components in any organization. The disclosure of this information can lead not only to material losses, but also to the loss of the reputation and image of the company, which ultimately, in some cases, can lead to its complete collapse. Therefore, in order to avoid these consequences, it is necessary to analyze the security and reliability of information processing systems. One of the most effective ways to do this is through the use of "penetration testing" methods. **The results obtained.** The section provides software vulnerabilities analysis. The most frequently used types of attacks and intrusions by cyber intruders are highlighted. In contrast to this, methods comparative analysis for identifying software vulnerabilities was carried out. It is concluded that it is advisable to improve the methods for identifying vulnerabilities through the recommendations complex use taking into account the existing security risks of software tools, the features of modern methodologies and software development tools, as well as the modern software penetration testing methods capabilities.

Keywords: information security; testing methods; vulnerable software; security testing.

Introduction

Currently, information security is one of the most important components in any organization, since the information processed in their information systems, to a greater or lesser extent, belongs to the categories of commercial secrets and personal data. The disclosure of this information can lead not only to material losses, but also to the loss of the reputation and image of the company, which ultimately, in some cases, can lead to its complete collapse. Therefore, in order to avoid these consequences, it is necessary to analyze the security and reliability of information processing systems. One of the most effective ways to do this is through the use of "penetration testing" methods. The term "penetration testing" means imitation of the actions of a real attacker to implement unauthorized entry into the information system [3, 7].

1. Software Vulnerabilities Analysis

Currently, modern digital computing and communication tools cannot be imagined without appropriate software. Moreover, the level of its quality is largely determined by the presence (or absence) of critical errors (bugs). This objectively existing factor cannot be ignored when assessing software vulnerabilities. Vulnerability can be the result of errors

made at various stages of software development (design, coding, etc.), of outdated cryptographic systems and authentication systems use, disregard for the rules and algorithms of secure programming, etc. Analysis of different levels standards and recommendations for information security showed that the term *vulnerability* is used to denote a flaw in the system, using which you can violate its integrity or cause incorrect operation.

Studies carried out have shown that some vulnerabilities are known only theoretically, while others are actively used and have known exploits. Free software security study by Edgescan, Coverity, OWASP fund, which analyzed the security of more than 1000 projects containing more than 150 million lines of code, showed that they contain more than 60 thousand vulnerabilities [1]. And the most common types of vulnerabilities can be identified (Table 1)

As you can see in Table 1, Microsoft software products and various Web browsers have been the most vulnerable types of software for a number of years. Edgescan Vulnerability Stats Report 2020 shows vulnerabilities exist in all popular Web browsers.

The report gives a security analysis for such popular Web browsers as Mozilla Firefox, Opera and Chrome. For example, the statistics of Chrome vulnerabilities is shown in Fig. 1.

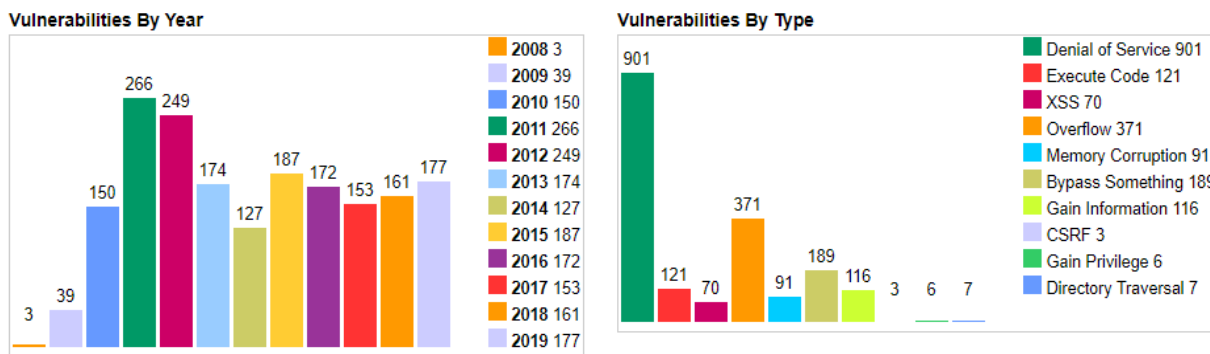


Fig. 1. Chrome Web Browser vulnerability statistics

Table 1 — The most common types of vulnerabilities

Vulnerability type	The percentage of identified vulnerabilities			Degree of criticality
	2018	2019	2020	
Vulnerabilities in software of private firms and non-governmental organizations				
BLUEKEEP CVE-2019-0708	15%	18%	17%	High
UNSUPPORTED SQL SERVER	14%	17%	17%	Middle
SQL INJECTION (WEB APPLICATION ATTACK)	17%	12%	11%	Middle
MS Office Memory Corruption Vulnerability CVE-2017-11882	-	8%	10%	Middle
RDP, MS12-020/, CVE-2012-0002	6%	7%	7%	High
SMB, MS17-010/, CVE-2017-0143 TO, CVE-2017-0148	6%	6%	6%	High
OTHER	42%	32%	32%	
Vulnerabilities in software of state institutions				
SQL INJECTION	41%	42%	42%	Middle
CROSS-SITE SCRIPTING (XSS)	20%	19%	20%	Middle
PHP MULTIPLE VULNERABILITIES	14%	16%	17%	High
REMOTE CODE EXECUTION	5%	7%	8%	High
SENSITIVE FILE DISCLOSURE	3%	5%	5%	High
OTHER	17%	11%	8%	

The studies carried out have shown that the most common vulnerabilities are the following:

Overriding a null pointer allows to execute a code outside the vulnerable software.

Resource leak. If after the program terminates or memory releases, the released resources are not cleared, then these memory areas may still contain the values of variables and other confidential information.

Dead code. The presence of unused sections of a code in the program allows an attacker to inject software bookmarks into these sections of the code and then use them to get unauthorized access to protected resources.

Using values before validation. If the software processes information coming from external sources without verification, then it is possible to generate such a variable value that will allow you to get full control over the vulnerable software.

Access to uninitialized variables. This vulnerability is similar in nature to the "Dead Code" vulnerability, when unused parts of software are used by an attacker to get a full control over a program.

Using an object after release allows to access the restricted information. *Buffer overflow* is a vulnerability that occurs when a computer program writes down data outside a buffer allocated in memory. Buffer overflow usually occurs due to improper handling of data received from outside and memory, without tight protection from the programming subsystem (compiler or interpreter) and the operating system. It should be noted that the mentioned above statistics and the list of vulnerabilities are not the exhaustive data. Unfortunately, the level of motivational components of cyber intruders very often exceeds the capabilities of individual IT companies which resist cyber-attacks. However, a number of methods for identifying software vulnerabilities have been developed and are currently being used. Let's conduct out their comparative analysis.

2. Comparative analysis of methods for identifying vulnerabilities

The studies carried out have shown that currently, to improve the efficiency of identifying software

vulnerabilities, specific testing methods and recommendations are used. The goals, methods, algorithms and means of verification, rules for conducting and verification are indicated in them. The following ones are relevant for Ukraine: [1-8]:

- OSSTMM (Open Source Security Testing Methodology Manual);
- OWASP (Open Web Application Security Project) Testing Guide;
- PTES (Penetration Testing Execution Standard);
- NIST Special Publication 800-115: Technical Guide to Information Security Testing and Assessment (NIST SP 800-115);
- BSI – Study A Penetration Testing Model;
- ISSAF — Information System Security Assessment Framework;
- THE NATIONAL BANK OF UKRAINE BOARD RESOLUTION of 28.09.2017 № 95 «On Approval the Provision about Organization of Measures on Ensure Information Security in the Banking System of Ukraine».

Each of these documents has its own characteristics (advantages and disadvantages). The research is carried out in several stages (Fig. 2), which allow to structure knowledge and comprehensively assess the security of software. In general, the results of comparing methodologies by phases of vulnerability tests can be illustrated with Fig. 3.

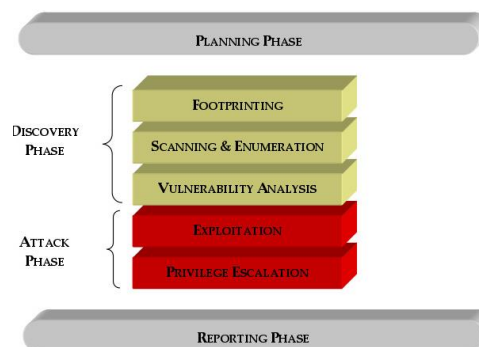


Fig. 2. Software security testing stages

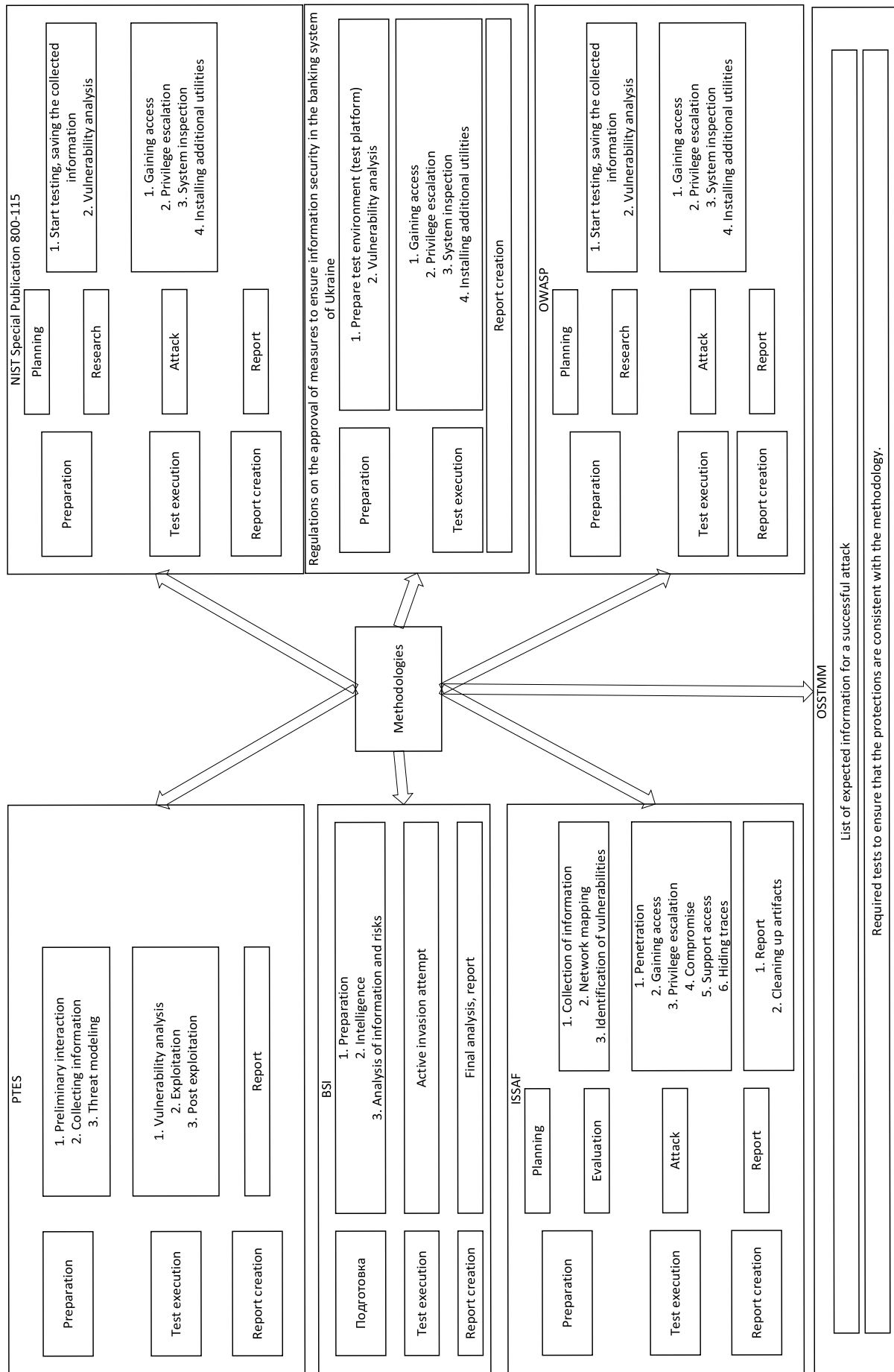


Fig. 3. Classification of methodologies by phases of vulnerability tests

Table 2 contains a comparison of the methods being studied, where the objects of research are divided into 3 standard phases:

- Preparation,
- Execution of tests
- Generation of a report.

Table 3 contains a comparison of methods according to the specified criteria using a similar system of point grades from 0 to 10.

The presented results of the methodologies assessment showed the imperfection of any of them. For example, the best methodology in the test execution and reporting phases – OWASP does not meet the requirements of the experts in the preparation phase. Vice versa, the OSSTMM methodology, which was highly appreciated by experts at the first stage of preparing the pre-test material, has a low rating at the later stages of software security research.

Table 2 – Comparison of the investigated methodologies according to three standard phases

Methodology, Phases	OWASP	OSSTMM	NIST SP	BSI	ISSAF	PTES	Resolution of the NBU Board № 95
Preparation							
Customer approval of testing modes	0	7	1	0	5	7	7
Execution and signing of the contract	0	7	1	0	5	7	8
Tests execution							
Collecting information about the object	8	1	4	8	8	7	0
Identification of vulnerabilities	8	1	3	8	8	8	1
Analysis of information and risks	8	1	2	8	8	8	2
Active invasion attempts	8	1	5	8	8	8	0
Enabling the following intrusion	8	0	0	0	8	8	0
Report creation							
Artifact cleaning	5	1	2	4	5	8	0
Report creation	5	7	4	8	7	9	2
Analysis and recommendations for found vulnerabilities elimination	10	2	4	8	4	9	1
Description of risks	10	1	3	8	4	9	2

Table 3 – Comparison of methodologies by criteria

Methodology, Phases	OWASP	OSSTMM	NIST SP	BSI	ISSAF	PTES	Resolution of the NBU Board № 95
Description of the information a cracker can obtain	5	8	1	0	2	0	2
Description of the penetration testing goals	10	4	5	10	1	5	3
Detailed description of the methodology	10	4	9	7	6	10	0

Based on this, it can be concluded that it is advisable to improve the methods for identifying vulnerabilities through the complex use of recommendations taking into account the existing security risks of software tools, the features of modern methodologies and software development tools and the capabilities of modern software penetration testing methods.

Conclusions

The section analyzes the software vulnerabilities. The priority of software security requirements and the obligation to follow these requirements at all stages of the software life cycle are shown. Research and

comparative analysis of methods for identifying vulnerabilities have been carried out; lack of attention from developers to security issues has been indicated.

The expediency of improving the existing methods of software penetration testing by synthesizing a new software testing method taking into account increased security requirements is indicated.

Acknowledgment

The Slovak Research and Development Agency (Agentúra na Podporu Výskumu a Vývoja) supported this work under the contract no. APVV-18-0027 titled “New methods development for reliability analysis of complex system”.

REFERENCES

- (2020), *Edgescan's 2020 Vulnerability Stats Report Released*, available at: <https://www.edgescan.com/edgescans-2020-vulnerability-stats-report-released/>
- Kostadinov, Dimitar (2016), *Introduction: Intelligence Gathering & Its Relationship to the Penetration Testing Process* available at: <https://resources.infosecinstitute.com/penetration-testing-intelligence-gathering/>
- Nickerson, C. (2012), *The Penetration Testing Execution Standard*, available at: http://www.pentest-standard.org/index.php/PTES_Technical_Guidelines
- Scarfonem K., Souppayam M., Codym A. and Orebaugh, A. (2012), *NIST Special Publications 800-115 Technical Guide to Information Security Testing and Assessment*, USA, Gaithersburg, 80 p., available at: <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-41-Rev1/sp800-41-rev1.pdf>
- (2012), *Study A Penetration Tesing Model*, Germany, Bonn, 111 p., available at: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Publications/Studies/Penetration/penetration_pdf.pdf?_blob=publicationFile

6. (2018), *The Open Source Security Testing Methodology Manual*, available at: <http://www.isecom.org/mirror/OSSTMM.3.pdf>.
7. Vacca, John R. (2017), *Computer and Information Security Handbook Elsevier*, 1280 p.
8. (2018), *XPathInjection*, available at: URL:https://portswigger.net/kb/issues/00100600_xpath-injection.

Надійшла (received) 21.01.2021

Прийнята до друку (accepted for publication) 07.04.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

- Ліцзян Джан** – викладач коледжу комп'ютерних наук, Типовий університет Нейцзяна, Нейцзян, Кітай;
Zhang Liqiang – teacher, College of Computer Science, Neijiang Normal University, Neijiang, China.
e-mail: zhangliq@njtc.edu.cn; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1278-2209>.
- Цао Вейлін** – викладач інформаційного центру ІТ, Типовий університет Нейцзяна, Нейцзян, Кітай;
Caο Weilin – teacher, Department of IT information Centre, Neijiang Normal University, Neijiang, China.
e-mail: caowl@njtc.edu.cn; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8230-5235>.
- Рабчан Ян** – PhD, факультет управлінських наук та інформатики, Жилінський університет, Жиліна, Словаччина;
Jan Rabčan – PhD, Faculty of Management Science and Informatics, University of Žilina, Žilina, Slovakia;
e-mail: Jan.Rabcan@fri.uniza.sk; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2835-9114>.
- Давидов Вячеслав Вадимович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри "Обчислювальна техніка та програмування", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Vіacheslav Davydov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: vyacheslav.v.davydov@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2976-8422>.
- Мірошніченко Наталія Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Обчислювальна техніка та програмування", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Nataliia Miroshnichenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: natnikdr@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4329-7126>.

Аналіз і порівняльне дослідження методів тестування програмного забезпечення на проникнення

Чжан Ліцзян, Цао Вейлін, Я. Рабчан, В. В. Давидов, Н. М. Мірошніченко

Анотація. Інформаційна безпека є одним з найважливіших компонентів в будь-якій організації, оскільки інформація, що обробляється в їх інформаційних системах, в більшій чи меншій мірі відноситься до категорій комерційної таємниці і персональних даних. Розкриття цієї інформації може призвести не тільки до матеріальних втрат, а й до втрати репутації та іміджу компанії, що в кінцевому підсумку в деяких випадках може привести до її повного краху. Тому, щоб уникнути цих наслідків, необхідно проаналізувати безпеку і надійність систем обробки інформації. Один з найбільш ефективних способів зробити це - використовувати методи «тестування на проникнення». Отримані результати. У розділі проведено аналіз вразливостей програмного забезпечення. Виділено найбільш часто використовувані кіберзлочумишленниками види атак і вторгнень. На противагу цьому проведено порівняльний аналіз методик виявлення вразливостей ПЗ. Зроблено висновок про доцільність вдосконалення методик виявлення вразливостей шляхом комплексного використання рекомендацій з урахуванням існуючих ризиків безпеки програмних засобів, особливостей сучасних методологій і засобів розробки ПО, а також можливостей сучасних методик тестування ПО на проникнення. З метою аргументованого вибору технологій математичної формалізації процесу тестування проведені аналіз і порівняльне дослідження найбільш перспективних з них.

Ключові слова: інформаційна безпека; методи тестування; вразливе програмне забезпечення; тестування безпеки.

Анализ и сравнительное исследование методов тестирования программного обеспечения на проникновение

Чжан Лицзян, Цао Вейлин, Я. Рабчан, В. В. Давыдов, Н. Н. Мирошніченко

Аннотация. Информационная безопасность является одним из важнейших компонентов в любой организации, поскольку информация, обрабатываемая в их информационных системах, в большей или меньшей степени относится к категориям коммерческой тайны и персональных данных. Раскрытие этой информации может привести не только к материальным потерям, но и к потере репутации и имиджа компании, что в конечном итоге в некоторых случаях может привести к ее полному краху. Поэтому, чтобы избежать этих последствий, необходимо проанализировать безопасность и надежность систем обработки информации. Один из наиболее эффективных способов сделать это - использовать методы «тестирования на проникновение». **Полученные результаты.** В разделе проведен анализ уязвимостей программного обеспечения. Выделены наиболее часто используемые киберзлочумишленниками виды атак и вторжений. В противовес этому проведен сравнительный анализ методик выявления уязвимостей ПО. Сделан вывод о целесообразности усовершенствования методик выявления уязвимостей путем комплексного использования рекомендаций с учетом существующих рисков безопасности программных средств, особенностей современных методологий и средств разработки ПО, а также возможностей современных методик тестирования ПО на проникновение. С целью аргументированного выбора технологий математической формализации процесса тестирования проведены анализ и сравнительное исследование наиболее перспективных из них.

Ключевые слова: информационная безопасность; методы тестирования; уязвимое программное обеспечение; тестирование безопасности.

Applied problems of information systems operation

UDC 623.942.2:623.592

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.21>Volodymyr Andryeyev¹, Valentyn Chernobai¹, Yurii Babkin¹, Olha Taran¹, Vladimir Kot¹, Olena Anenkova²¹ Military Institute of Tank Troops of National Technical University, Kharkiv, Ukraine² State boarding school with enhanced military and physical training "Cadet Corps" Kharkiv, Ukraine

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING BATTERIES OF THE LATEST TECHNOLOGIES ON SAMPLES OF ARMORED WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

Abstract. The **subject matter** of the article is mass and dimensional characteristics of batteries, their design, electrical, operational parameters and energy capabilities. The **goal** of the study is the possibility of using maintenance-free batteries on samples of armored weapons and military equipment. **The tasks** to be solved are: to analyze the existing technologies for the batteries production, their advantages and disadvantages given the peculiarities of the operation of military equipment and the main technical characteristics of the batteries; by statistical data processing to investigate the dependences of "starter" discharge modes and energy capabilities of the batteries manufactured by technologies of different generations; to investigate the possibilities of constructive implementation of power supply formation taking into account possible design changes in the engine starting system, ensuring the necessary charge stability and compensation for exceeding the cost of gel and Absorbed in Glass Mat (AGM) batteries in comparison with the cost of the type 12ST85 ones. General scientific and special **methods** of scientific knowledge are used. The following **results** were obtained: The existing technologies of battery production, their advantages and disadvantages have been analyzed taking into account the peculiarities of the operation of military equipment and the main technical characteristics of batteries. The dependences of the "starter" discharge modes and the energy capabilities of batteries made by different technologies generations have been studied. Possibilities of constructive realization of power supply formation taking into account available constructive changes in the engine electric start system, providing the necessary charge stability and compensation for excess cost of gel and AGM batteries compared to the cost of batteries type 12ST85 have been investigated. **Conclusions.** Using at the samples of armored vehicles and military equipment batteries made by modern technology does not require fundamental structural changes in the electrical equipment of the machine. To meet the requirements of the standards for voltage parameters in the on-board armored weapons and military equipment networks, it is necessary to install an appropriate voltage relay regulator. The issue of exceeding the cost of gel and AGM batteries compared to the cost of type 12CT-85 ones can be compensated by the absence of costs for operating materials, maintenance personnel as well as the long service life of gel or AGM batteries compared to conventional lead-acid ones.

Keywords: lead-acid batteries; gel batteries; AGM batteries, electrical equipment for armored vehicles and military equipment.

Introduction

Formulation of the problem and research tasks.

At present, the 12CT-85P and 6STEN-140M types lead-acid starter batteries of are mainly used as power sources in the native military wheeled and tracked vehicles. In the technology terms such batteries belong to the so-called maintenance-free class. The advent in modern industries the latest technologies can significantly improve the batteries resource and empower their applications. Lead-acid, gel and AGM batteries as the most suitable types of batteries for use as starters in military tracked and wheeled vehicles have their advantages and disadvantages. Of course, the change in the material resource costs ideology, approximation to world industry standards and NATO standards, in particular, require research into the possibility of using the latest production technologies. In order to justify recommendations for the inserting the batteries in the prospective and existing armored weapons and military equipment (AMWE) samples it is necessary not only to analyze the AMWE specific use

but of operation features, mass and dimensions of the batteries, but also to study their design, electrical, operational parameters and energy capabilities.

In addition, it needs to be taken into account economic assessment of the prospects for replacing existing batteries with maintenance-free ones, the cost of operating materials, personnel maintenance of the batteries, etc.

The above indicates the **relevance** of the study of the prospects for the use of battery of the latest production technologies in military and wheeled vehicles.

Analysis of recent research and publications.

The structure, the principle of operation of lead-acid battery are described by experts in a very meaningful way, because the first workable lead-acid batteries for use in engineering were invented in the XIX century [1, 2]. Recommendations for operation, maintenance and control of batteries are also, of course, very carefully worked out, as starter lead-acid batteries were used on AMWE samples in the Soviet Army [3, 4]. Given the unconditional thoroughness of the generalization of

military experience, the provisions on the modes of bringing batteries into working condition, the volume and frequency of battery maintenance, the order of their storage outside the machine and in the machine today are obsolete and economically suboptimal.

The **goal** of the study is study the possibility of using maintenance-free batteries on samples of armored weapons and military equipment.

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

- to analyze the existing technologies for the batteries production, their advantages and disadvantages given the peculiarities of the operation of military equipment and the main technical characteristics of the batteries;

- by statistical data processing to investigate the dependences of “starter” discharge modes and energy capabilities of the batteries manufactured by technologies of different generations;

- to investigate the possibilities of constructive implementation of power supply formation taking into account possible design changes in the engine starting system, ensuring the necessary charge stability and compensation for exceeding the cost of gel and Absorbed in Glass Mat (AGM) batteries in comparison with the cost of the type 12ST85 ones.

General scientific and special **methods** of scientific knowledge are used.

Main material

1. The existing technologies for the batteries production, their advantages and disadvantages given the peculiarities of the operation of military equipment and the main technical characteristics of the batteries. According to their functional purpose, lead-acid batteries is divided into four main groups: starter, stationary, traction and portable.

As a source of electrical energy in AMWE samples, it is the starter batteries that are used to start internal combustion engines and power supply of machine devices. In its development, lead-acid starter batteries have gone through the following stages.

The first generation of batteries can be classified as open or closed type batteries with liquid electrolyte, with a capacity of 36 to 5328 Ah and a service life of 10 to 20 years or more. Open-type batteries have no caps and the electrolyte is in direct contact with open air. Closed-type batteries have special plugs that ensure the retention of sulfuric acid aerosols. The plugs for filling electrolyte and adding water are unscrewed during operation. Closed type batteries can be maintained and maintenance-free. In the latter case, batteries from the manufacturer are supplied filled and charged, and during the service life there is no need to fill the system, since the design of the plugs of such batteries ensures that its vapors are contained in the form of condensate.

Maintained batteries are the cheapest energy storage. But at the same time, they not only require daily monitoring of operation, but also have a short service life caused by cracking, depressurization, and oxidation of battery cells. For batteries with filled electrolyte, in order to prolong the battery's performance, it is recommended to carry out a control-

training cycle: first, discharge it with a current equal to 0,1 capacity, with an electrolyte density corresponding to the area of operation, and then charge it in the usual way, after which it can be operated.

Advantages of Lead Acid Starter Batteries:

- low cost and production simplicity (at the cost of 1 W•h of energy, these batteries are the cheapest);
- proven, reliable and well-understood service technology;

- permissible high discharge currents.

At the same time, lead-acid batteries have the following disadvantages:

- low energy density and, as a consequence, high weight of storage batteries;

- the smallest number of charge-discharge cycles in comparison with other types of batteries (on average 250 cycles);

- acidic electrolyte and lead have a harmful effect on the environment, hazardous to service personnel;

- overheating is possible with an incorrect charge;

- they cannot be stored in a discharged state, since a full discharge causes the formation of sulfates and such a loss of capacity after which are not restored;

- they are sensitive to deep discharges so a deep discharge causes an additional voltage similar to the voltage of a mechanical device. In fact, each discharge / charge cycle takes a small amount of capacity from the battery. This loss is very small in the good battery condition, but becomes more noticeable as soon as the capacity drops below 80% of the nominal;

- hydrogen is evolved;

- at temperatures above 30°C the formation of sulfate occurs in a geometric progression;

- at low temperatures, the batteries capacity decreases;

- limited shelf life of a battery with electrolyte is 1,5 years at a temperature not exceeding 0°C and 9 months at a temperature above 20°C to prevent irreversible processes;

- slow charge reception (normal time is from 8 to 16 hours) in comparison with other types of accumulators.

- high self-discharge is up to 1-2% per day, which leads to the formation of sulfate, during operation, this figure increases;

- energy losses for heat generation during charging are up to 15-20%;

- the need to conduct in-station control charge-discharge cycles at least once every six months;

- the need to check and replenish the electrolyte level in connection with its boiling during operation;

- battery life is limited to 5 years, subject to maximum compliance with the rules of operation.

Thus, lead-acid batteries are usually used when a large capacity is required, the weight requirements are not critical and the cost of the battery is low.

It should be noted that these characteristics of the batteries led to their widespread use on AMWE samples inherited from the Soviet Army.

Low-maintenance battery is the best choice in terms of cost and quality. It possesses rather high performance characteristics, has access for filling the

electrolyte and from time to time requires monitoring the electrolyte level. A sealed serviced battery is the most expensive battery. It has no holes for filling the electrolyte and requires a relatively stable charging voltage [5].

The so-called sealed gel batteries, in which instead of a liquid electrolyte, a gel is used, which is a jelly obtained by mixing a solution of sulfuric acid with a thickener (usually it is silicon dioxide SiO_2 or silica gel). The gel electrolyte allows to achieve full tightness of the battery as all gas release occurs inside strongly developed system of pores in weight of gel. The technology for the production of gel batteries is called GEL.

During drying, microcracks are formed in the gel structure prevent the evaporation of the electrolyte: oxygen and hydrogen molecules are retained inside the gel, react with each other and turn into water, which is absorbed by the gel. Almost all evaporation is thus returned to the battery and this process is called gas recombination. However, all the molecules cannot be recombined and the excess gas is discharged through the safety valves. This usually occurs at high charge currents. Microporous dyuroplastic is used as a separator in gel batteries. Due to aluminum additives, it has high resistance in aggressive environments, reduces the internal resistance in the battery, has high temperature stability and mechanical strength, which also provides high vibration resistance and impact resistance of the structure.

The authors highlight the following as the advantages of gel batteries:

- small energy losses for heat generation during charging (10-16%);
- they do not require maintenance during the entire period of operation;
- sealed case allows you to install batteries in the most convenient place from the point of view of designers - near the center of gravity;
- there is no hydrogen evolution;
- small self-discharge (up to 1-3% per month);
- non-critical sensitivity to deep short-term discharge (gel electrolyte is in a “bound” state, battery discharge is not accompanied by its evaporation, lattice corrosion and shift of the active mass of the positive electrode);
- withstand about 1000 charge-discharge cycles and, accordingly, a long service batteries life is about 10-12 years;
- batteries can be in a discharged state for a long time.

Disadvantages of gel batteries are the following:

- to prevent abundant gas evolution during recharging, it is necessary to use chargers that provide instability of the charge voltage not worse than $\pm 1\%$;
- it is critical to ambient temperature: operating temperature from -40° to $+45^\circ\text{C}$ (temperature over 45°C significantly reduces battery resource);
- the cost is 2-3 times higher than conventional lead-acid ones.

Further improvements in the design of gel lead-acid batteries are sealed batteries with electrolyte absorbed by separators - third generation batteries. They

are often called batteries assembled by AGM technology (AGM – Absorbed in Glass Mat), i.e. a technology in which the electrolyte is absorbed in fiberglass separators placed between the electrodes. Such a separator is a porous system in which capillary forces hold the electrolyte. The amount of electrolyte is dosed so that the small pores are filled and the large ones remain free for the free circulation of the released gases. In terms of their properties, AGM batteries are similar to gel batteries, except that they have significantly less gas formation, and the ambient temperature has less impact on their operation. The most widespread were the following brands: Tudor, Marathon, Sprinter, Absolyte, Stark, Hawker, Dekka, EXtreme. Monbat Gem (Fig. 1).



Fig. 1. AB Monbat Gem 670 901 105 (170 Ah)

As advantages of AB: AGM-technologies one can named the following:

- energy losses for heat generation during charging - about 4%;
- during all term of operation do not demand service, are not critical to temperature decrease;
- hermetic case;
- no hydrogen evolution;
- self-discharge 1-3% per month;
- low internal resistance, when charging the battery is almost not heated.

Since AGM battery is a kind of GEL, they have the same disadvantages. Comparison of the main technical characteristics of batteries 12CT-85, EXTREME 670901105 and EXTREME E89AF0_1 type are shown in table 1 [6, 7].

2. Investigation the dependences of “starter” discharge modes and energy capabilities of the batteries manufactured by technologies of different generations.

Justification of the use of the latest batteries on AMWE samples is proposed on the basis of a study of their design, electrical, operational parameters and energy capabilities.

By statistical data processing in the MATLAB environment, graphs of dependence of “starter” modes of discharge 12CT-85P batteries and AGM AB EXTREME 670901105 ones were obtained; and 6CT-140 AZ (3) EXTREME E89AF0_1 (low maintenance). The results of the study are presented in Fig. 2.

The measurement results correspond to the discharge mode of a 12CT-85P battery with a current of approximately 400 A at a temperature of 25°C . Batteries manufactured using the latest technologies were studied with a “starter” current of 500A at a temperature of 25°C (Fig. 3).

Table 1 – The main technical characteristics of the batteries 12CT-85, EXTREME 670901105 and EXTREME E89AF0_1 types

Parameter	Battery		
	12CT-85	EXTREME 670901105	EXTREME E89AF0_1
Rated voltage, V	24	12	12
Nominal capacity, Ah	85	170	140
Weight with electrolyte, kg no more	70	70	70
Length, mm, no more	586	513	513
Width, mm no more	243	223	189
Height, mm no more	240	223	220
Volume, m ³ no more	0,034	0,025	0,021
Cost, \$ USD	590	720	140

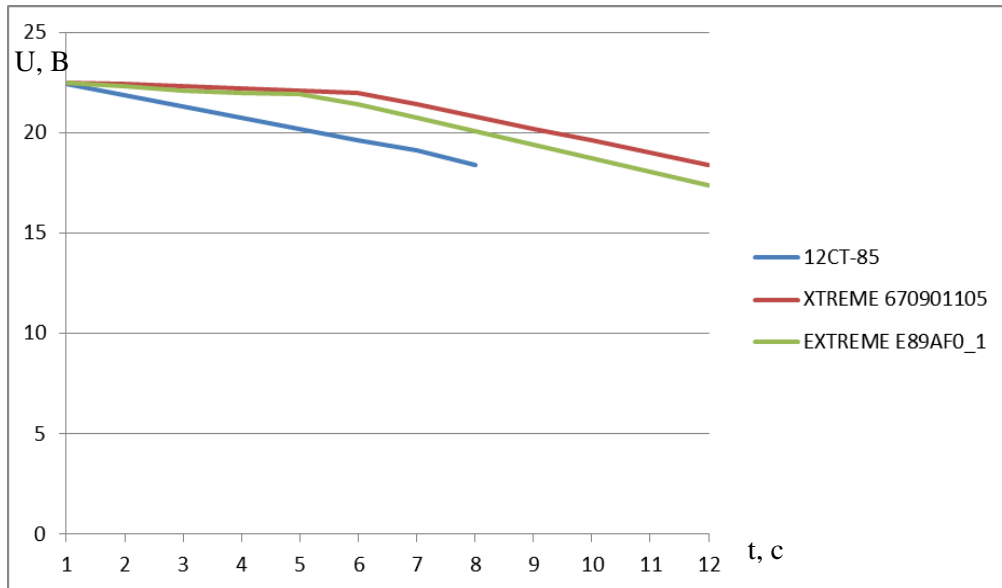


Fig. 2. Starter modes of battery discharge for 12CT-85P AGM EXTREME 670901105; and 6CT-140 AZ (3) EXTREME E89AF0_1 types batteries

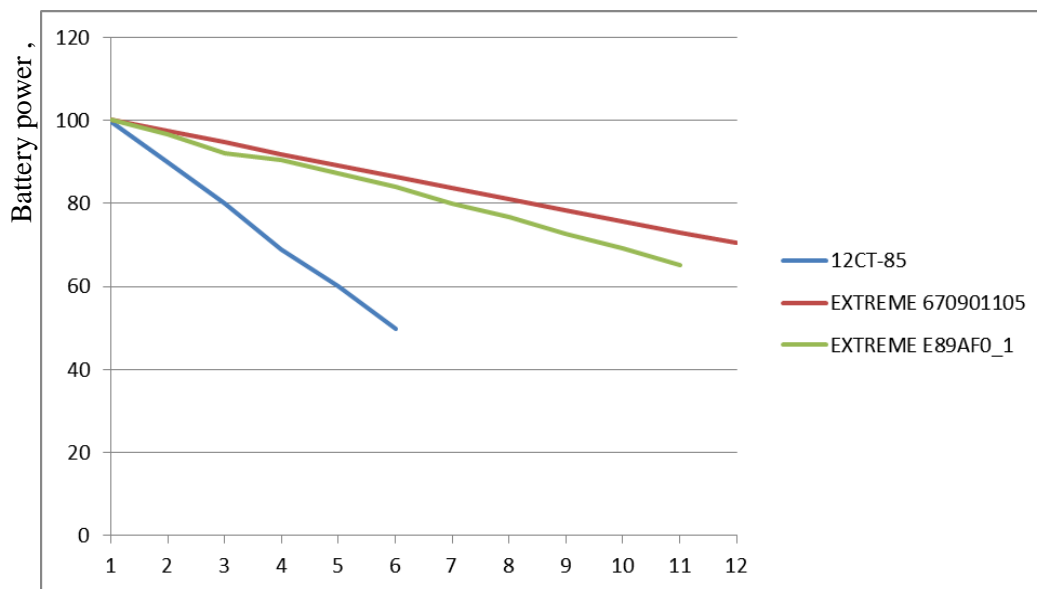


Fig. 3. Self-discharge 12CST-85P AGM EXTREME 670901105; and 6CT-140 AZ (3) EXTREME E89AF0_1 types batteries at a temperature of 25 °C

Thus, according to research, it can be concluded that AGM-batteries have a lower internal resistance compared to other types of batteries, capable of emitting higher currents in a short time.

Investigation of the various types batteries' energy capabilities of made it possible to draw a conclusion about the advantages of gel and AGM batteries over lead-acid batteries while maintaining the same level of mass and dimensional characteristics (Fig. 4).

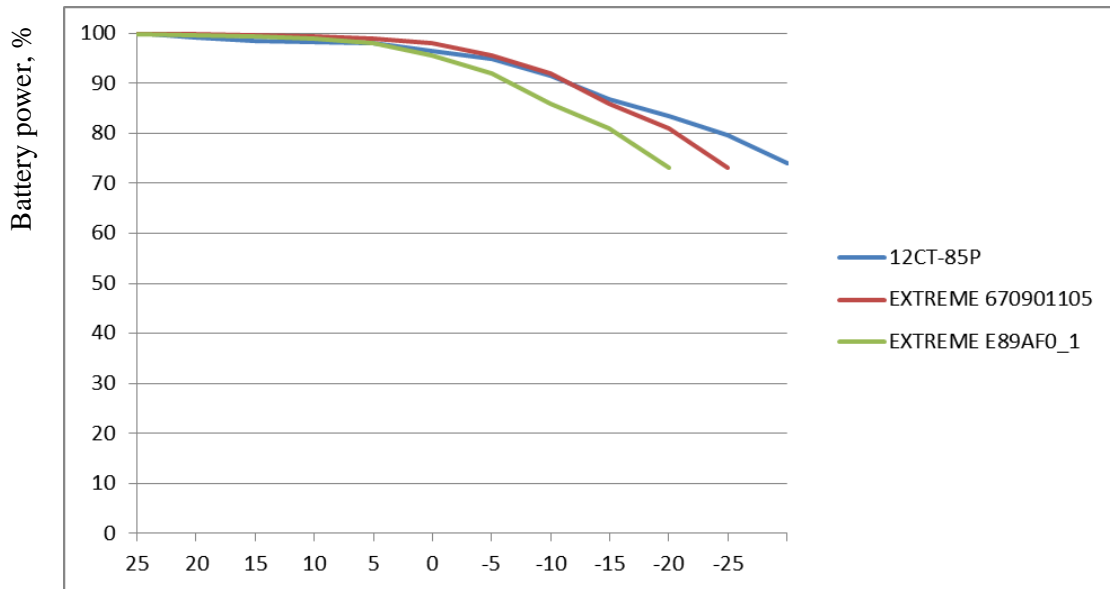


Fig. 4. The value of the power delivered by the batteries of different technologies depending on the temperature

As it is known, 4 batteries are installed in the tank. They are combined into 2 groups, which are connected in series-parallel. The battery groups are connected to the tank on-board network (BN) through the starter-generator relay (RSG) in parallel. To power the starter-generator (SG) when starting the engine, the RSG switches the batteries to a serial connection (48V) [8]. For a power source formed from 4 12CT-85 type batteries, the following ratios will be correct:

$$U_{gr}^{12CT} = U_1 = U_2 = 24V ; \tag{1}$$

$$U_{SG}^{12CT} = U_{zpl}^{12CT} + U_{zgr2}^{12CT} = 24V + 24V = 48V ; \tag{2}$$

$$U_{BN}^{12CT} = U_{gr1}^{12CT} = U_{gr2}^{12CT} = 24V = 48V ; \tag{3}$$

$$C_{gr}^{12CT} = C_1^{12CT} + C_2^{12CT} = 85A \cdot h + 85A \cdot h = 170A \cdot h ; \tag{4}$$

$$C^{12CT} = C_{gr1}^{12CT} + C_{gr2}^{12CT} = 170A \cdot h + 170A \cdot h = 340A \cdot h . \tag{5}$$

That is, to form a power source in the tank, it is advisable to use 4 AGM- batteries, so that a series connection of two AGM- batteries s in a group will provide 24 V. Such batteries connection will provide 24V and 48V supply to the BM when starting the SG, respectively.

$$U_{gr}^{AGM} = U_1^{AGM} + U_2^{AGM} = 12V + 12V = 24V ; \tag{6}$$

$$U_{SG}^{AGM} = U_{gr1}^{AGM} + U_{gr2}^{AGM} = 24V + 24V = 48V ; \tag{7}$$

$$U_{BN}^{AGM} = U_{gr1}^{AGM} = U_{gr2}^{AGM} = 24V . \tag{8}$$

In this case, the capacity issued by the AB group will be

$$C^{AGM} = C_1^{AGM} = C_2^{AGM} = 170A \cdot h ; \tag{9}$$

$$C^{AGM} = C_{gr1}^{AGM} + C_{zgr2}^{AGM} = 170A \cdot h + 170A \cdot h = 340A \cdot h . \tag{10}$$

It follows from relations (1) - (10) that the use of AGM-batteries to form a power source in a tank does not require structural changes in the engine electric starting system and provides the required values of electrical parameters while generally maintaining the same level of mass and dimensional characteristics (Fig. 5).

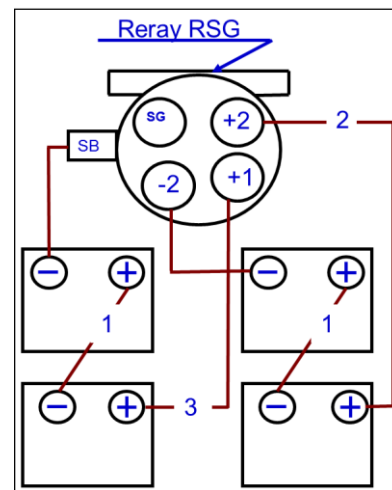


Fig. 5. Formation of the tank power supply using AGM-batteries

Note that when using AGM-AB type 6CT-140 AZ (3) EXTREME E89AF0_1 under similar conditions, the total capacity of the power supply will be

$$C^{AGM} = 280A \cdot h . \tag{11}$$

Of course, this value is less than similar (10), but can also be taken into account in certain circumstances. Similar conclusions can be drawn for the formation of the power supply on other AMWE samples.

Thus, when using two AGM-batteries type EXTREME 670901105, the total capacity of the power supply for the BMP-2 will be:

$$C^{AGM} = C_1^{AGM} = C_2^{AGM} = 170A \cdot h. \quad (12)$$

Similarly, the voltage that will be generated by the formed power supply in the BN is:

$$U^{AGM} = U_{gr1}^{AGM} + U_{gr2}^{AGM} = 12V + 12V = 24V. \quad (13)$$

Conclusions

1. Using at the samples of armored vehicles and military equipment batteries made by modern

technology does not require fundamental structural changes in the electrical equipment of the machine.

At the same time, the fact that the latest technologies batteries occupy a smaller volume and have side terminals will require revision of the places of their installation in the car, namely, baskets and jumpers.

2. To meet the requirements of the standards for voltage parameters in the AMWE on-board network it is necessary to install an appropriate voltage relay regulator.

3. The issue of exceeding the cost of gel and AGM batteries compared to the cost of type 12CT-85 ones can be compensated by the absence of costs for operating materials, maintenance personnel as well as the long service life of gel or AGM batteries compared to conventional lead-acid ones.

REFERENCES

1. Dasoyan, M.A., Kurzukov, N.I., Tyutyrymov, O.S. and Yagnyatinsky, V. M. (1991), *Starter batteries*, Transport, Moscow.
2. Patrick T. Moseley, Jurgen Garche, Parker, C. D. and Rand, D.A.J., (2004), *Valve-Regulated Lead-Acid Batteries*, Elsevier B.V., Amsterdam, NL, available to: <http://bookree.org/reader?file=676368&pg=1>
3. (1986), *Lead starter batteries: a guide*, Voenizdat, Moscow, SU.
4. Gumelev, V.Yu. and Parkhomenko, A.V. (2013), "Interchangeability of starter batteries of the armored personnel carrier BTR-80", *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii*, No. 6, available to: <https://technology.snauka.ru/2013/06/2069>
5. Bondar, A.I., Degtyar, S.M., Pavlenko, S.A. and Smolyakov, V A. (2013), "Prospects for the use of batteries in military tracked and wheeled vehicles", *Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya*, No. 3, pp. 7-13.
6. (2015), *AGM Valve Regulated Lead Acid Batteries*, Installation and operating instructions, Technical guide, EMEA.
7. Magazine autoExpert, available to: http://autoexpert-consulting.com/O_Nas.html
8. (1986), *Object 434. Technical description and operating instructions Book two*, Voenizdat, Moscow, SU

Received (Надійшла) 23.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.04.2021

Андрєєв Володимир Олександрович – заступник начальника інституту з озброєння – начальник озброєння, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;

Andryeyev Volodymyr – Deputy Chief of the Institute of Armaments - Chief of Armaments, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: volodimir_andreev@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4081-321X>.

Чорнобай Валентин Михайлович – магістрант за профілем кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;

Valentyn Chornobai – Undergraduate 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: valikchornobay5@gmail.com ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9489-8082>.

Бабкін Юрій Валерійович – старший викладач кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;

Yurii Babkin – Senior Lecturer of the Armored weapons and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: yribabkn@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9156-9523>.

Таран Ольга Василівна – старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії факультету озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;

Olha Taran – Senior researcher of the research laboratory of the Faculty of Armaments and military equipment, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: olga_taran@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9143-5821>.

Кот Володимир Вікторович – викладач кафедри експлуатації озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;

Vladimir Kot – Lecturer of the Armored weapons and military equipment Operation Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: vladimirkot7576@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9152-8705>.

Аненкова Олена Віталіївна – вчитель хімії, Державна гімназія-інтернат з посиленою військово-фізичною підготовкою "Кадетський корпус", Харків, Україна;

Olena Anenkova – Chemistry teacher, State boarding school with enhanced military and physical training “Cadet Corps”, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: lalh_kadet@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9992-6510>.

Аналіз можливості використання акумуляторних батарей новітніх технологій на зразках бронетанкового озброєння та військової техніки

В. О. Андреев, В. М. Чернобай, Ю. В. Бабкін, О. В. Таран, В. В. Кот, О. В. Аненкова

Анотація. Предметом вивчення в статті є масо-габаритні характеристики акумуляторних батарей, їх конструктивні, електричні, експлуатаційні параметри та енергетичні можливості. Метою дослідження є можливості використання акумуляторних батарей, що не обслуговуються, на зразках бронетанкового озброєння та військової техніки. **Завдання дослідження:** Проаналізувати існуючі технології виробництва акумуляторних батарей, їх переваги та недоліки з огляду на особливості експлуатації військової техніки та основні технічні характеристики акумуляторних батарей. Шляхом статистичної обробки даних дослідити залежності “стартерних” режимів розряду та енергетичних можливостей акумуляторних батарей, виготовлених за технологіями різних поколінь. Дослідити можливості конструктивної реалізації формування джерела живлення з урахуванням можливих конструктивних змін у системі електропуску двигуна, забезпечення необхідної стабільності заряду та компенсації перевищення вартості гелевих та AGM- акумуляторних батарей в порівнянні з вартістю акумуляторних батарей типу 12СТ85. Методологічною основою дослідження стали загальнонаукові та спеціальні методи наукового пізнання. **Отримані наступні результати:** Проаналізовані існуючі технології виробництва акумуляторних батарей, їх переваги та недоліки з огляду на особливості експлуатації військової техніки та основні технічні характеристики батарей. Досліджені залежності “стартерних” режимів розряду та енергетичних можливостей акумуляторних батарей, виготовлених за технологіями різних поколінь. Досліджені можливості конструктивної реалізації формування джерела живлення з урахуванням можливих конструктивних змін у системі електропуску двигуна, забезпечення необхідної стабільності заряду та компенсації перевищення вартості гелевих та AGM акумуляторних батарей в порівнянні з вартістю акумуляторних батарей типу 12СТ85. **Висновки.** Використання на зразках бронетанкового озброєння та військової техніки акумуляторних батарей, виконаних за новітніми технологіями, не потребує принципових конструктивних змін у електрообладнанні машини. Для забезпечення вимоги стандартів щодо параметрів напруги у бортових мережах об’єктів бронетанкового озброєння та військової техніки необхідне встановлення відповідного регулятора напруги. Перевищення вартості гелевих та AGM акумуляторних батарей в порівнянні з вартістю батарей типу 12СТ-85 може бути компенсовано відсутністю витрат на експлуатаційні матеріали, персонал, що забезпечує обслуговування АБ типу 12СТ85, а також тривалим терміном служби гелевих або AGM акумуляторних батарей в порівнянні з звичайними кислотно-свинцевими батареями.

Ключові слова: свинцево-кислотний акумулятор; гелеві акумуляторні батареї; AGM акумуляторні батареї; електрообладнання зразків бронетанкового озброєння та військової техніки.

Анализ возможности использования аккумуляторов батарей новейших технологий на образцах бронетанкового вооружения и военной техники

В. А. Андреев, В. М. Чернобай, Ю. В. Бабкин, О. В. Таран, В. В. Кот, Е. В. Аненкова

Аннотация. Предметом изучения в статье является массогабаритные характеристики аккумуляторов батарей, их конструктивные, электрические, эксплуатационные параметры и энергетические возможности. Целью исследования является возможность использования аккумуляторов батарей, не обслуживаемых на образцах бронетанкового вооружения и военной техники. **Задачи исследования:** проанализировать существующие технологии производства аккумуляторов батарей, их преимущества и недостатки учитывая особенности эксплуатации военной техники и основные технические характеристики аккумуляторов батарей. Путем статистической обработки данных исследовать зависимости “стартерных” режимов разряда и энергетических возможностей аккумуляторов батарей, изготовленных по технологиям разных поколений. Исследовать возможности конструктивной реализации формирования источника питания с учетом возможных конструктивных изменений в системе электропуска двигателя, обеспечения необходимой стабильности заряда и компенсации превышения стоимости гелевых и AGM-аккумуляторов батарей по сравнению со стоимостью аккумуляторов батарей типа 12СТ85. Методологической основой исследования стали общенаучные и специальные методы научного познания. **Получены следующие результаты:** Проанализированы существующие технологии производства аккумуляторов батарей, их преимущества и недостатки учитывая особенности эксплуатации военной техники и основные технические характеристики батарей. Исследованы зависимости “стартерных” режимов разряда и энергетических возможностей аккумуляторов батарей, изготовленных по технологиям разных поколений. Исследованы возможности конструктивной реализации формирования источника питания с учетом возможных конструктивных изменений в системе электропуска двигателя, обеспечения необходимой стабильности заряда и компенсации превышения стоимости гелевых и AGM аккумуляторов батарей по сравнению со стоимостью аккумуляторов батарей типа 12СТ85. **Выводы.** Использование на образцах бронетанкового вооружения и военной техники аккумуляторов батарей, выполненных по новейшим технологиям, не требует принципиальных конструктивных изменений в электрооборудовании машины. Для обеспечения требования стандартов параметров напряжения в бортовых сетях объектов бронетанкового вооружения и военной техники необходима установка соответствующего регулятора напряжения. Превышение стоимости гелевых и AGM аккумуляторов батарей по сравнению со стоимостью батарей типа 12СТ85 может быть компенсировано отсутствием затрат на эксплуатационные материалы, персонал, обеспечивающий обслуживание АБ типа 12СТ85, а также длительным сроком службы гелевых или AGM аккумуляторов батарей по сравнению с обычными кислотно-свинцовыми батареями.

Ключевые слова: свинцево-кислотный аккумулятор; гелевые аккумуляторные батареи; AGM аккумуляторные батареи; электрооборудование образцов бронетанкового вооружения и военной техники.

Adalat Pashayev¹, Elkhan Sabziev^{1,2}, Arif Hasanov²

¹Institute of Control Systems of Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

²War College of the Armed Forces of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

THE PROBLEM OF REDISTRIBUTION OF RADIO FREQUENCY USED IN THE ORGANIZATION DIVISIONS

Abstract. The problem of radio frequency distribution is considered in the article, taking into account the regulations and geographical location of the operating units. The problem of assigning radio frequencies from among those assigned for corporate use is studied. Using conformal mapping, it was substantiated that any territory can be divided into zones, each of which will have a border with only three other zones. In this case, in each zone, you can assign frequencies in the amount of one quarter of the total number of available frequencies that do not overlap with frequencies assigned to adjacent zones. A mathematical model of the problem of radio frequency redistribution has been built, taking into account the regulations and the geographical location of the units. The implementation of algorithm allows taking into account the history of frequency distribution by zones, which allows you to completely update the used radio frequencies for a new period of operation. A software module has been compiled that generates frequencies at random from those available for assigning corporate use for each zone. The software module allows fast and frequent reallocation of frequencies by zones, thereby ensuring the safety, reliability and stability of communication between organizational units.

Keywords: redistribution of radio frequencies; radio frequency spectrum; radio frequency range; algorithm; geographic location; adjacent zones.

Introduction

The management of the radio frequency spectrum is an important area of government activity in the direction of increasing the efficiency of using radio frequency resources. The issue of radio frequency allocation is one of the significant tasks in radio transmission, radio communications, radio competition and other similar areas that use electromagnetic waves to transmit information. The choice and allocation of a frequency band for use by certain services, institutions, organizations is determined by their specifics and working conditions. There are various studies devoted to the problems of managing the use of the radio frequency spectrum, including the tasks of their redistribution between different branches of radio frequency operation [1]. At the same time, with the exception of some small deviations, all countries of the world use the same radio frequencies for their intended purpose [2–4].

Radio frequency (RF) spectrum management is an analytical, procedural and political approach to planning and managing the electromagnetic spectrum. Over the past 15 years, the European Union has paid special attention to the development of the digital economy in the internal market through the use and management of the radio frequency spectrum policy [5–8].

In 2002, according to the filing by the Radio Spectrum Management Council and the Parliament, a Framework Directive and an Access Directive were issued, related to the powers of the European Union for the management of spectrum in radio communications [6, 7]. This document gave a powerful impetus to the development of the EU digital economy.

There are different approaches to the allocation of radio frequencies, depending on the geographical location, interstate relations and the level of development of countries. In Europe, special attention is paid to the issue of planning and allocation of radio

frequencies. Taking the limited availability of radio frequency resources into account, they are often classified under two groups – resources for permanent and temporary use. In some cases, the possibility of distributing frequencies by hours depending on the time of day is also considered.

However, every organization that uses radio communication at work, faces the task of distributing the frequency range between its divisions, within the limits of the permissible frequencies allocated for it. To increase the ability to use more different radio frequencies, the geographic area is divided into a reasonable number of distinct zones. This allows to duplicate the used radio frequencies in non-contiguous zones without disrupting the operation of radio equipment in adjacent zones.

Depending on the existing regulations, a number of criteria and conditions can be put forward to the frequency allocation rules, described by a set of regulatory rules. Among them there are the bandwidth for one radio frequency channel, periodic changes in the frequency of the unit, etc.

In this paper, we consider the problem of developing an algorithm for the allocation of radio frequencies, taking into account the regulations and the geographical location of the operation units.

The statement of the problem

In the general case, an organization is allocated a certain range of radio frequencies for the operation of its subdivisions by setting its lower and upper limits, for example, 30000kHz , and 88000kHz .

Considering the bandwidth for one radio frequency (RF) channel, the total number of n permissible operating frequencies can be determined. For example, if the bandwidth for one RF channel is (grid spacing), 25kHz then the total number of allowed frequencies will be 34000.

However, restrictions are often imposed on some frequencies or on a range of frequencies contained within specified limits, which must be considered in the distribution.

Let the whole territory be divided into a finite number of zones.

In each zone, the assignment of frequencies for one or another corporate user is carried out on the basis of some considerations. The main regulatory restrictions are related to the geographical location of the operational units' location zones.

Their essence is as follows:

- The entire territory is subdivided into separate zones;

- Distribution of frequencies by zones is carried out for a certain period, after which the frequencies are redistributed;

- Distribution of frequencies by zones is carried out for a certain period;

- After a certain period of time, the frequencies are redistributed between the zones again.

Frequency allocation by zones must meet the following conditions:

1) in each limited operational period, for each separate zone, radio frequencies must be allocated in the amount established for this zone;

2) within one zone, all frequencies must be different;

3) the frequencies in the "adjacent" areas must also be different. And in non-contiguous areas, frequencies can be repeated;

4) the frequencies allocated for each zone must be different from the frequencies allocated for the same zone in the previous period of operation.

Adjacent zones are zones that have common boundaries.

For example, Fig. 1 shows 8 zones designated by the symbols A, B, C, D, E, F, K, N. Zone A shares borders with zones B, E and F. Consequently, in each period of under consideration, the frequencies used in zone A cannot coincide with the frequencies used in zones B, E and F.

The frequencies used in Zone C cannot match the frequencies used in Zones B, D, E. And in zone N, any frequencies can be used, since this zone does not have a common border with other zones.

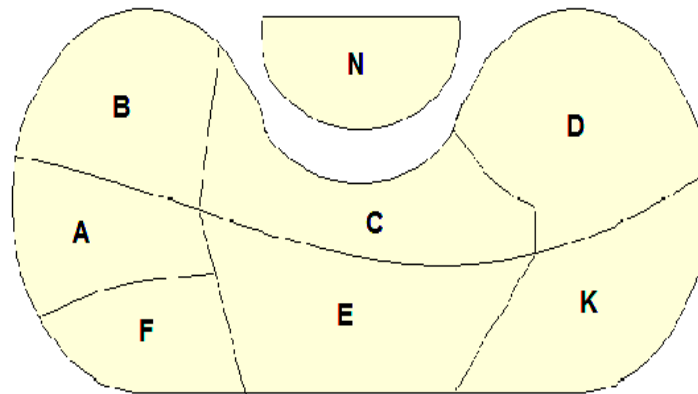


Fig. 1. Geographical location of zones

Let us give an estimate of the number of possible frequency distributions between zones. Let some region be given: country, island, etc. It is required to split this area in such a way that each sub-area (let's call them zones) has a common border with no more than three other zones.

Also, the union of these zones is the same as the original area.

If the area is a rectangle, then one of the options for dividing it into non-intersecting zones with the described properties can be triangulation –, i.e. dividing the area into triangles.

Since any simply connected area can be conformally mapped onto a circle [9, 10], it is obvious that any simply connected convex area can be mapped onto a rectangle by continuous mapping. Triangles will be one of the solutions to the problem.

Thus, the distribution of frequencies between a large number of areas is reduced to the problem of frequency distribution between four areas. For each area has a border with three other areas (zones).

Let us have n frequencies at our disposal. They can be numbered, for example, in ascending wavelength or frequency.

Let us denote them by $f_i, i = 1, 2, \dots, n$. The total number of available frequencies will be $k = \left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor$.

Let's assign, for example, for the zone numbered i the radio frequency

$$f_j : j \in [i \cdot k, (i+1) \cdot k].$$

This distribution satisfies conditions 1) -3).

In order to satisfy condition 4) we'll assume that the previous distribution was carried out by the same algorithm, but with a shift of the parameter i by one module 4.

That is, for $i = i_0 + 1$ at $i_0 < 4$, and $i = 1$ at $i_0 < 4$.

Thus, with a given frequency allocation algorithm, each zone can be provided with k of different frequencies that satisfy conditions 1) -4).

Based on this algorithm, it is possible to distribute frequencies not in order, but randomly. In fact, random numbering of frequencies will provide a solution to this problem. Here is an implementation of algorithm.

Algorithm for generating a list of frequencies

Let's denote the set of all admissible frequencies with F . This set, obviously, contains all frequencies,

$$f_0 + i \times \Delta f, \quad n = \left[\frac{f_1 - f_0}{\Delta f} \right], \quad i = 0, \dots, n,$$

with the exception of the forbidden ones, which are specified by their enumeration or in the form of intervals. Here:

f_0 - the lower limit of the permissible frequencies,

f_1 - the upper limit of the permissible frequencies,

Δf - the minimum difference between the basic values of frequencies,

$[\cdot]$ - means the whole fraction.

Depending on the number of prohibited frequencies, the total number of F will be a certain number $M \leq n$.

Let the total number of zones (territories) within which it is planned to distribute frequencies be N .

Let's number these zones from 1 to N and denote by A_k and B_k , accordingly, the set of radio frequencies that are used by radio stations at the current moment and the set of radio frequencies that are to be allocated by radio stations in the zone with the number k , where $k = 1, 2, \dots, N$.

Let's denote by \mathfrak{Z}_k the set of indices of the broadcasting zones that have an adjacent (common) border with the zone number k . Obviously, for different k , the number of elements may be different.

For example,

$$\mathfrak{Z}_1 = \{2, 3, 4, 6\}, \quad \mathfrak{Z}_2 = \{1, 3, 4\} \text{ etc.}$$

Let's denote an operator generating a random subset of a given set in the number of m elements with $\mathfrak{R}(m)$, where m is not more than the total number of elements of the original set.

The principle of generating new parts by zones is based on the selection of random frequencies from among those allowed for this zone, with the exception of frequencies used in this zone at the current moment and coincidence with the frequencies of adjacent zones. It is easy to see that such a selection of frequencies can be implemented as follows:

$$\mathfrak{R}(m): F \setminus A_1 \rightarrow B_1,$$

$$k = 2, \dots, N,$$

$$\mathfrak{R}(m): F \setminus A_k \setminus \bigcup_{j < k, j \in \mathfrak{Z}_k} B_j \rightarrow B_k.$$

Thus, the result of applying this algorithm is the set B_k , ($k = 1, 2, \dots, N$), representing a set of new frequencies.

While the described algorithm provides non-repeatable frequencies of adjacent zones, it also allows the use of the same frequencies in non-adjacent zones, thereby increasing the choice in allocating frequencies to zones.

Conclusion

Thus, we have studied the problem of assigning radio frequencies from among those assigned for corporate use by organizations. It was shown that any territory can be divided into zones, each of which will have a border with only three other zones.

In this case, in each zone, you can assign frequencies in the amount of a quarter of the total number of available frequencies that do not overlap with the frequencies assigned in adjacent zones.

A mathematical model of the problem of radio frequency redistribution has been built, taking into account the regulations and the geographical location of the operation units. The implementation algorithm makes it possible to take into account the history of frequency distribution by zones, which allows you to completely update the used radio frequencies for a new service life.

A software module has been compiled that generates frequencies for assigning corporate use for each zone. The software module allows fast and frequent reallocation of frequencies by zones, thereby ensuring the safety, reliability and stability of communication between organizational units.

REFERENCES

1. Veerpalu, V.E. (2012), "Methods of redistribution and conversion of the radio frequency spectrum", *T-Comm: Telecommunications and transport*, No. 6, pp. 12-16, available at <http://media-publisher.ru/old/pdf/Nom-6-2012-sait.pdf>.
2. (2007), *Rules for allocation, registration, use and determination of radio frequencies* [Rules for the allocation, registration, use and payment of radio signals], approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Azerbaijan Republic No. 22 dated 01.02.2007, available link <http://www.dri.az/view.php?lang=en&menu=8075&id=1590>
3. (2000), *The national table is broken by the low radio frequency of Ukraine*, VR Ukraine, Law "On Radio Frequency Resources of Ukraine" 01.06.2000 N 1770-III.
4. (2006), *Table of distribution of frequency bands between the radio services of the Russian Federation*, Resolution of the Government of the Russian Federation of 15.07.2006, No. 439-23, available at the link http://www.grfc.ru/grfc/sprav_info/tab1_chastot
5. Ryszard, Struzak, Terje, Tjelta and Jose P., Borrego (2015), "On Radio-Frequency Spectrum Management", *The Radio Science Bulletin*, No. 354 (September 2015), pp. 11-34.

6. Ron, Davies (2015), "Radio spectrum: A key resource for the Digital Single Market", *European Parliamentary Research Service*, Briefing, March -2015, 8 p.
7. (2018), *Analysis and assessment of global trends in the use of the radio frequency spectrum by various radio communication services*, available at the link <http://minsvyaz.ru/uploaded/files/kontsepsiya-radiokontrolya-prilozhenie-2.pdf>.
8. Buzov, A.L., Bykhovsky, M.A., Vaseho, N.V., Volkova, Yu.V., Zhiltsov, A.U., Ivanova, T.V., Nosov, V.I., Sevostyanov, S.V., Sorokin, A.S. and Sorokin G.I. (376), *Management of the radio frequency spectrum and electromagnetic compatibility of radio systems*, Tutorial, Eco-Trends, Moscow, 376 p.
9. Grishchenko, O.Yu. and Onotsky, V.V. (2015), *Course of lectures on complex analysis. Part one*, Kyiv, 143 p.
10. Fedak, I.V. (2020), *Course of lectures on functional analysis and theory of measure. Tutorial. Part 3. Basic structures of functional analysis*, PNU named after Vasyl Stefanyk, Ivano-Frankivsk, 48 p.

Received (Надійшла) 22.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.04.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Пашаев Адалат Бахтияр – кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник, завідувач лабораторії, Інститут систем управління Національної академії наук Азербайджану, Баку, Азербайджан;
Adalat Bakhtiyar Pashayev – Candidate of Physics and Mathematics, Head of laboratory, Control Systems Institute of Azerbaijan National Academy of Sciences; Baku, Azerbaijan;
e-mail: adalat.pashayev@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9208-8430>.

Сабзіев Ельхан Наріман оглу – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Інститут систем управління Національної академії наук Азербайджану, Баку, Азербайджан,
Elhan Nariman oglu Sabziev – Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Institute of Control Systems of Azerbaijan National Academy of Sciences;
e-mail: elkhan.sabziev@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8150-9439>.

Гасанов Аріф Гасан огли – кандидат національної безпеки і військових наук, доцент, Військова Академія Збройних Сил Азербайджанської Республіки, Баку, Азербайджан,
Arif Hasan oglu Hasanov – PhD in National security and Military Sciences, Associate Professor, War College of the Armed Forces of the Republic of Azerbaijan, Baku Azerbaijan;
e-mail: Arif.H.Hasanov@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8814-1590>.

Завдання перерозподілу радіочастот, що використовуються в підрозділах експлуатації

А. Б. Пашаев, Е. Н. Сабзіев, А. Г. Гасанов

Анотація. В роботі розглядається задача розподілу радіочастот, з урахуванням регламентів і географічного розташування підрозділів експлуатації. Досліджено задачу призначення радіочастот з числа заданих для корпоративного користування. Застосуванням конформного відображення було обґрунтовано, що будь-яку територію можна розбити в зони кожна з яких матиме кордон тільки з трьома іншими зонами. При цьому в кожній зоні можна призначити частоти в кількості однієї чверті від кількості доступних частот, які не перетинаються з частотами, призначеними в суміжні зони. Побудовано математичну модель задачі перерозподілу радіочастот, з урахуванням регламентів і географічного розташування підрозділів. Алгоритм реалізації дозволяє враховувати історію розподілу частот по зонам, що дозволяє повністю оновити використовувані радіочастоти до нового терміну експлуатації. Складено програмний модуль, який генерує частоти випадковим чином з числа доступних для призначення корпоративного користування по кожній зоні. Програмний модуль дозволяє швидко та часто перерозподіл частот по зонам, тим самим забезпечує безпеку, надійність і стійкість зв'язку між підрозділами організації.

Ключові слова: перерозподіл радіочастот; радіочастотний спектр; діапазон радіочастот; алгоритм; географічне розташування; суміжні зони.

Задача перераспределения радиочастот, используемых в подразделениях эксплуатации

А. Б. Пашаев, Э. Н. Сабзиев, А. Г. Гасанов

Аннотация. В работе рассматривается задача распределения радиочастот, с учетом регламентов и географического расположения подразделений эксплуатации. Исследована задача назначения радиочастот из числа заданных для корпоративного пользования. Применением конформного отображения было обосновано, что любую территорию можно разбить в зоны каждая из которых будет иметь границу только с тремя другими зонами. При этом в каждой зоне можно назначить частоты в количестве одной четверти из общего количества доступных частот, которые не пересекаются с частотами, назначенными в смежные зоны. Построена математическая модель задачи перераспределения радиочастот, с учетом регламентов и географического расположения подразделений. Алгоритм реализации позволяет учитывать историю распределения частот по зонам, что позволяет полностью обновить используемые радиочастоты к новому сроку эксплуатации. Составлен программный модуль, который генерирует частоты случайным образом из числа доступных для назначения корпоративного пользования по каждой зоне. Программный модуль позволяет быстрое и частое перераспределение частот по зонам, тем самым обеспечивает безопасность, надежность и устойчивость связи между подразделениями организации.

Ключевые слова: перераспределение радиочастот; радиочастотный спектр; диапазон радиочастот; алгоритм; географическое расположение; смежные зоны.

Aziz Mashalla Talibov ^{1,2}, Bakhtiyar Vagif Guliyev ¹

¹ War College of Armed Forces of the Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan

² Institute of Control Systems of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

A METHOD FOR ASSESSING THE MILITARY-ECONOMIC INDICATORS WITH THE PURPOSE OF LOCATING A LOGISTICS CENTER FOR REDEPLOYING TROOPS

Abstract. The article proposes a methodology for assessing the economic efficiency of a logistics center that provides technical support to redeploying troops. It is noted that the development of this method is based on the assessment of the efficiency of the logistics center, taking into account its economically efficient functionality, without regard to the use of classical profitability. The author analyzes the structure of capital expenditure and operating expenses allocated for the establishment of a logistics center, proposing the maintenance and repair expenses for each unit of equipment as the main criterion, proposing their calculation in the general case, and substantiating the military-economic indicators of the center. An analysis of the structure of capital expenditure and operating expenses aimed at organizing a logistics center, as well as the military-economic indicators of this center, gives grounds to note the following results: the structure of capital expenditure and operating expenses associated with designing a logistics center for the troops has been elaborated; the calculation method has been developed, taking into account the available resources, communications and infrastructure, information reflected in the annual plans for the operation and maintenance of automotive and armored vehicles of military units; the calculation methodology developed on the basis of the structure of capital expenditure and operating expenses on the organization of a logistics center also reflects the infrastructure indicators related to the geographic location of the center (the distance of the logistics center from the transport hub and the military units it services); the proposed method can be used to choose a geographic location that is favorable from the point of view of economic profitability for organizing a logistics center for the troops; using this method, it is possible to compare the economic aspects of various options of organizing military logistics.

Keywords: logistics center; logistics infrastructure; spare parts warehouse; repair sites; structure of operating expenses; depreciation expenses; structure of capital expenditure.

Introduction

Logistics infrastructure in the Armed Forces is the material and technical support to troops in peacetime and wartime, planning, management of procurement, transportation, storage, distribution, as well as other material and non-material activities related to the operation, repair and maintenance of various types of vehicles, machines and equipment, as well as the system performing such operations as processing, transmitting and protecting information related to these processes. From this perspective, a logistics center, which is an important element of the military logistics infrastructure, should have movable (vehicles of various types and purposes, equipment, machines, systems, etc.) and immovable property (warehouses, parking lots, repair sites, administrative buildings, etc.), suitable for fulfilling its purpose of ensuring the combat readiness of troops. When location planning for a logistics enterprise in the civilian sector, its economic profitability is considered the key factor. The profitability of an enterprise means that the funds spent on its organization will be obtained in a short period of time after the launch of the enterprise and returned to the income account, and from that moment the enterprise will operate with a positive balance and will always generate income [1]. It is currently a widespread worldwide practice to draw up a business plan that substantiates the time frame for reaching the profitability threshold in order to finance the organization of a civilian logistics enterprise [2; 3].

Unlike civilian logistics enterprises, the military logistics infrastructure is aimed directly at ensuring the combat readiness of the country's armed forces;

therefore, its organization cannot be justified by the principles of independent economic activity. The recent practice of organizing military logistics centers in different countries involves putting forward various principles of efficiency [4 – 8]. These principles vary from country to country and depend on the country's military-political doctrine, geopolitical situation, military security policy and other factors. Changes in the modern geopolitical and military-geostrategic situation have formed a new reality associated with the protection of country's territorial integrity. In accordance with this reality, the efficient organization of logistics services in the armed forces of some countries of Central Asia and the Caucasus region (hereinafter – the Armed Forces) is one of the most relevant problems.

Modern world practice shows that the specialization of individual divisions of large industrial complexes in a certain field of activity leads to an improvement in the operation of the entire complex as a whole [9]. This trend is currently used in the armies of different countries, and individual services, including logistics, have begun to be organized as independent areas of activity. In accordance with this approach, the need for the logistics service functioning as an independent entity in the troops is substantiated in [10] and the basic requirements for its establishment is formulated. The organization of a logistics center in a selected area in accordance with these requirements puts forward the following main tasks:

- adaptation (improvement) of the territory;
- construction of administrative, industrial and warehouse facilities;
- construction of the infrastructure;
- setting up a security system;

- bringing operational elements and services into working order;
- bringing the number of automotive and armored vehicles to the required level and preparing them for operation;
- training the personnel and preparing the equipment for planning maintenance and repair, ordering, purchasing and maintaining the relevant property;
- preparation related to the delivery of spare parts to military units, the maintenance of automotive and armored vehicles;
- preparation related to the organization of repair of automotive and armored vehicles at repair sites, as well as in military units, etc.

The expenses on these tasks will vary depending on the location and structure of the military logistics center.

An analysis of the structure of the expenses on organizing the operation of an independent military logistics center in the armed forces and the development of a mechanism for assessing its efficiency constitute a scientific problem. This article highlights the results of the research aimed at solving this problem.

The solution to this problem is related to the study of the expenses on organizing a logistics center. Such expenses are associated with the implementation of various activities and practical work and their structure can vary within a wide range. In this regard, the expenses on building military a logistics center can be divided mainly into capital expenditures and operating expenses. The structure and procedure for calculating these expenses are presented as follows.

The structure of capital expenditure

These expenses include, first of all, costs of constructing administrative, industrial and warehouse buildings, adaptation (improvement) of the territory, purchasing machinery and equipment, setting up communication systems and security systems.

Existing buildings and suitable areas (repair sites, warehouses, etc.) can be used for organizing a logistics center, taking into account the new principles of troop deployment. In this case, the capital expenditure should include expenses not on the construction of the relevant facilities, but on the renovation and repair work of existing facilities. If we denote the cost of the immovable property project by C_0 , and the cost of renovation and repair work by C_1 , then the initial capital expenditure will drop to $(C_0 - C_1)$. Let us denote the expenses on immovable property by C_D , then

$$C_D = \begin{cases} C_0, & \text{when new facilities,} \\ C_1, & \text{when existing facilities.} \end{cases}$$

The Armed Forces under consideration currently do not have activities based on logistics infrastructure and logistics principles. The material and technical support to the troops is carried out on an ongoing basis and by means of the vehicles of the relevant military units. When creating elements of an independent logistics infrastructure (logistics center), vehicles in the system of logistical support of the troops (logistic battalion in commands and logistic company in formations) can be

used in full or in part. In this case, the capital expenditure will include only the costs associated with the purchase of new equipment (maintenance and repair workshops, trucks and other special equipment). Let us denote these expenses by C_A .

During the construction of the infrastructure of the logistics center, a water supply and sewerage system can be built that can meet the needs of its production activities, and in general, depending on the situation, this work can be carried out in different ways:

- laying pipelines from regional water supply systems. In addition to the construction of new pipelines from the water supply nodes to the logistics center, the installation of tanks to collect and store water supply can be considered if necessary;
- pumping water from nearby sources (rivers, canals, artesian wells, etc.). In this case, in addition to the expected traditional work, there are expenses on the purchase and installation of the pump and compressor unit. In this case, installing a technical water filtration system can also be considered (for instance, when using turbid river water);
- regular transportation of water from remote sources by road. In this case, the installation of water tanks or the construction of a pool should be planned as needed.

When the capacity of water sources considered separately is lower than the production demand of the logistics center, water supply from several sources can be considered. Let us denote all expenses on the construction of a water supply and sewerage system by C_S .

Building a gas supply system for the production requirements of the logistics center is one of the essential tasks. As natural gas is cheaper than other types of energy sources, this fuel is used in production whenever possible. If the capacity of the nearest gas distribution plant is lower than the production demand, a gas receiver station can be installed to collect it at the logistics center. A boiler room can also be installed in the territory of the center to heat production areas and office buildings during the cold months of the year.

Let us denote all expenses on the construction of a gas supply system by C_Q .

The operation of devices and equipment to be used at the repair sites of the logistics center, lighting of production areas and the territory, the operation of the necessary ventilation and cooling systems, as well as the operation of electronic computing equipment, including the electronic surveillance system in the territory, is ensured by electricity. Thus, the power supply system is one of the key systems, and its implementation can include the installation of a special regulating transformer in the territory of the logistics center. It is also advisable to have backup generators on the site so that the logistics center does not shut down in the event of possible accidental interruptions in the centralized power supply system. Let us denote all the expenses on the installation of a power supply system by C_E .

Fueling of the vehicle fleet of the logistics center should be carried out through a filling station to be built on its territory. Let us denote the costs of the construction of a filling station by C_Y .

Providing devices and equipment for repair sites occupies a special place among capital expenditure. As we know, high-precision, easy-to-use tools, devices and equipment have recently emerged due to rapidly developing technologies. This includes automatic wrenches used for disassembling and assembling machines and mechanisms, mobile devices for cutting and polishing metal, hydraulic lifts, high-precision automated locksmith and milling machines, measuring instruments, etc.

For the efficient operation of repair sites and crews, the logistics center must be equipped with the necessary machines and tools in accordance with the specifics of military equipment. Let us denote the expenses on the purchase and installation of machinery and equipment by C_Z .

The capital expenditure associated with the security system includes the costs of building fences from stone, concrete or other materials along the perimeter of the territory, building checkpoints at the entrance to and exit from the territory of the center, installing video cameras to monitor the territory, organizing communication and information services, arranging premises for various services. Let us denote these costs by C_M .

In view of the above, the capital expenditure required to organize a logistics center can be mathematically expressed as follows:

$$C = \alpha_C \cdot (C_D + C_A + C_S + C_Q + C_E + C_Y + C_Z + C_M), \quad (1)$$

where α_C is the reserve ratio associated with additional contingency costs, as a rule, taken as $\alpha_C = 1.05$ [11].

The structure of operating expenses

Operating expenses are the costs of overall activities to maintain automotive and armored vehicles in military units "attached" to the logistics center in a constantly serviceable condition.

Annual plans for operation and maintenance of automotive and armored vehicles of a military unit are drawn up for every financial year. These plans indicate the requirements for the number of automotive and armored vehicles of different brands, types and operational groups in the military unit, their mileage since the start of operation, the planned consumption of the engine service life for the operational year, engine service life until the next scheduled maintenance, Scheduled Maintenance 1 and Scheduled Maintenance 2, the number of medium and overhaul repairs, as well as requirements for special technical supply (batteries, car tires, canopies) [12].

Based on annual plans for operation and maintenance of automotive and armored vehicles, as well as standards for various repair and maintenance operations, the required spare parts are ordered in stages in a centralized manner. Delivery of property and spare parts from central warehouses to the logistics center, their storage, delivery of property to military units in the manner prescribed by the plan, maintenance of vehicles there, organization of medium and overhaul repairs are carried out by the management of the logistics center.

Expenses on these operations vary depending on the geographic location of the logistics center.

As a rule, the schedule of vehicle maintenance and property replacement is drawn up on a rotational basis.

This means that the vehicle maintenance is expected to be carried out in such a way that approximately the same amount of equipment on average is serviced per year.

This approach ensures even workload distribution for maintenance units in peacetime over the years. It is considered that the transportation of property and spare parts supplied on purchase order from central warehouses to the logistics center is carried out 4 times a year in approximately equal shares once a quarter [13].

Let us number the automotive and armored vehicles in the military units attached to the logistics center as $i = 1, 2, 3, \dots, N$. E.g., KamAZ-43114 with chassis number XTC432534F1328127, engine number K740/345872, military registration plate number 45-55 KS can be denoted by $i = 1$, UAZ-31512 vehicle with chassis number 364656, engine number 123456, military registration number 02-42 BB by $i = 3$, etc. N is the total number of automotive and armored vehicles in military units. The military units serviced by the logistics center can be formally numbered as $s = 1, 2, \dots$. To show that the i -th vehicle belongs to the s -th military unit, we will write $i \in H_s$.

Note that denoting the set of automotive vehicles in the s -th military unit by $H_s^{(1)}$ and armored vehicles by $H_s^{(2)}$, the set H_s can be divided into two parts: $H_s = H_s^{(1)} \cup H_s^{(2)}$. Below, such a division allows clearly writing down the formula for calculating the transportation costs.

Let us number spare parts and other property as $j = 1, 2, 3, \dots, J$. E.g., a 12V 6ST-75 accumulator battery can be denoted by $j = 1$, an FP-130 taillight by $j = 2$, 245/45R18 tires by $j = 3$, etc. J is the total number of assorted property and spare parts.

Let us also denote the types of maintenance and repair by natural numbers: suppose $k = 1, 2$ is Scheduled Maintenance 1 and Scheduled Maintenance 2, respectively, $k = 3$ is medium repair, $k = 4$ is overhaul repair.

For the mathematical formalization of costs, we take the following notation. If the i -th vehicle is expected to undergo the k -th type maintenance (repair) in the plan year, then we will write $p_{ik} = 1$, otherwise $p_{ik} = 0$. If the j -th spare part or property is to be used in the k -th type maintenance (repair) of the i -th vehicle, we write $h_{ikj} = 1$, if it is not necessary, then $h_{ikj} = 0$. Let the required number of j -th spare parts for this repair work be denoted by n_{ikj} . E.g., if URAL-4320 needs installing 6 14.00x20 tires during maintenance at $k = 2$, then $n_{ikj} = 6$, respectively.

Since the main indicator in road transport is the weight of the cargo, it has to be taken into account when drawing up the report. To this end, we denote the weight of the j -th type property and spare parts by m_j . Then the total weight of the property and spare parts to be supplied in the plan year will be

$$p_0 = \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J m_j n_{ikj} h_{ikj} p_{ik}.$$

If we take into account the existing transport infrastructure in the areas where the troops are deployed and connecting these areas with the center, we can say that the delivery of property will be carried out mainly by combined transport. In this case, if we denote the costs of transporting one ton of cargo from the central warehouse to the nearest cargo terminal (site or node for transferring cargo from one mode of transport to another) by λ_0 , and the costs of transportation from the cargo terminal to the warehouses of the logistics center per 1 km of the route by λ_0 , then the total transportation expenses will be

$$P_E = (\lambda_0 + l_0 \cdot q_0) \cdot p_0. \quad (2)$$

Here l_0 is the distance from the cargo terminal to the logistics center.

As a rule, vehicle maintenance is carried out in the territory of the military units where the vehicle is located. To do this, it is necessary to deliver to these military units the property necessary for maintenance, spare parts, a specialized maintenance crew and special equipment. It should be noted that depending on the geographical location of the spare parts warehouse and the military units, and the existing road infrastructure, the route for the delivery of spare parts can be chosen in such a way that the costs are minimal, i.e. the issue of minimizing the route can be considered. The problems of optimization of cargo transportation from the warehouse to various consumer enterprises have been studied in different formulations in the scientific and technical literature [14–17]. The solution to this type of problem, which is usually referred to as the traveling salesman problem, may vary even depending on the optimality criteria set for the same locations. Since the annual operation and maintenance plan involves approximately the same regularity of maintenance of vehicles located in different military units, the weight of the property to be transported to these military units on one vehicle can be assumed approximately equal. Then the minimum transportation expenses can be calculated on the basis of the criterion of the minimum total length of the distance traveled.

Suppose that the optimal route has been calculated and that the distance to the s -th military unit on this route is l_s . Then the following formula can be applied to calculate the transportation expenses:

$$P_H = \sum_{s=1,2,\dots} \{q_s l_s \cdot \sum_{k=1}^2 \sum_{i \in H_s} \sum_{j=1}^J m_j n_{ikj} h_{ikj} p_{ik}\}, \quad (3)$$

where q_s is the transportation expenses for an average of one ton of cargo per 1 km of the route from the warehouse of the logistics center to the s -th military unit. In general, the values of q_s may differ from each other and from the value of q_0 , which is due to the varying degrees of comfort of the roads between the transportation points.

Another aspect of organizing maintenance of vehicles located directly in the territory of a military unit is the timely delivery of specialists to the site to carry out this work. Depending on the scope of the work to be carried out, the maintenance crew can be brought to the military unit by appropriate transport (e.g., a minibus) by selecting an appropriate route. Maintenance or repair work in military units can take several days. Therefore,

in contrast to the organization of the transportation of spare parts, the maintenance crew needs to be transported to the military unit several times. In general, the number of repeat days can be considered proportional to the number of vehicles in this military unit. Denoting the coefficient of proportionality by β , we obtain the expression $\beta \sum_{i \in H_s} p_{ik}$ for the number of trips of the maintenance crew to the s -th military unit. If we denote the costs of transporting a maintenance crew per 1 km of the route by q_b , and the distance to the s -th military unit along the shortest route by r_s , then their transportation expenses P_B are calculated as follows:

$$P_B = 2 \cdot q_b \cdot \beta \cdot \sum_{s=1,2,\dots} \{r_s \cdot \sum_{k=1}^2 \sum_{i \in H_s} p_{ik}\}. \quad (4)$$

According to the annual plan for operation and maintenance of automotive and armored vehicles, vehicles are to be regularly delivered to the repair plant (i.e., to the repair sites to be set up at the logistics center), where they are to undergo medium (overhaul) repair. As a rule, automotive vehicles that have survived to medium and overhaul repair are able to move on their own, and they arrive at the repair plant under its own power. However, according to statistics, approximately $f_1 = 35\%$ of the vehicle fleet, which underwent medium (overhaul) repairs in peacetime, lose the ability to move on their own at that time [18]. This means that those vehicles must be towed to the repair plant during the year. Armored vehicles ($f_2 = 100$) sent to the repair plant in order to preserve their engine service life are towed in all cases. The annual towing expenses (P_T) can be calculated based on the total number of vehicles located in the s -th military unit and the distance from the repair plant to this military unit along the direct route as follows:

$$P_T = \sum_{s=1,2,\dots} \{r_s \cdot [\sum_{i \in H_s^{(1)}} f_1 + \sum_{i \in H_s^{(2)}} f_2]\}. \quad (5)$$

As noted above, maintenance of automotive and armored vehicles is carried out at the repair sites of the logistics center, which have the necessary equipment, machinery, devices and tools. There are two groups of expenses associated with the operation of this equipment. The first group includes such expenses as the purchase of fuels and lubricants, quickly failing spare parts, tools and equipment, as well as other expendable supplies. Including this property in the list of property and spare parts used for maintenance, the expenses for delivering them to the logistics center can be calculated from formula (2).

The second group includes depreciation expenses on the equipment of the logistics center. Tools, devices and machinery, vehicles, equipment of filling stations, as well as security system devices, computer equipment and other equipment, which are the main means of production, become obsolete (wear out) over time and need to be removed and replaced with new ones. For this purpose, the enterprise is expected to annually allocate depreciation expenses in the amount equal to a certain portion of the book value of these assets. Let us denote these expenses by R_A . The calculation of depreciation expenses is based on the acts of the relevant legislation of the country to which the Armed Forces belong. The straight-line method can be used to calculate these

expenses. Under this method, the depreciation amount allocated to each piece of equipment owned by the enterprise can be determined as the ratio of its book value to its useful life, measured in years. Then the amount of R_A will be equal to the sum of the depreciation amounts calculated for all equipment.

Payroll expenses can be added to the list of operating expenses. These expenses can in principle be divided into two groups. The first group includes the salaries of the officers managing the logistics center, the employees of the security service, filling stations and other auxiliary units (sanitary maintenance of the territory and buildings, etc.). The salaries of the employees in this group can be considered equal for all similar enterprises.

Let us denote the annual payroll allocated to those employees by M_H .

The second group includes the salaries of drivers and engineers and specialists of the repair plant. Let us denote them by M_S and M_Z , respectively. The number of drivers and, accordingly, the size of their payroll can be considered proportional to the number of cars in the vehicle fleet:

$$M_S = \gamma_0 \cdot N_0. \tag{6}$$

Here, N_0 is the total number of vehicles owned by the logistics center, γ_0 is the coefficient of proportionality. For instance, the average annual salary of a driver on a rotating schedule can be taken as γ_0 .

Similarly, we can calculate the payroll for the repair plant workers. It can be assumed that the required number of workers can be calculated as a linear combination of the number of medium and overhaul repairs stipulated in the annual plan for operation and maintenance of automotive vehicles:

$$M_Z = \sum_{i=1}^N (\gamma_1 \cdot p_{i3} + \gamma_2 \cdot p_{i4}). \tag{7}$$

The numerical coefficients γ_1 and γ_2 here can be determined based on the average number of employees required by the standards for medium and overhaul repairs.

Thus, the following formula can be written to calculate the average annual operating expenses:

$$Q = \alpha_P \cdot (P_E + P_H + P_B + P_T) + R_A + \alpha_M \cdot (M_H + M_S + M_Z). \tag{8}$$

Here, α_P and α_M are the reserve ratio associated with additional contingency costs.

As a rule, for industrial enterprises, it is taken as $\alpha_P = \alpha_M = 1,4$ [11].

The key military-economic indicators

The procedure for calculating the two key indicators related to the location of the logistics center in the area is given above. The first is the capital expenditure, calculated from formula (1), and the second is the annual operating expenses, calculated from formulas (2) – (8). Although these indicators are to some extent informative for solving the financing problems, they are absolute and do not allow assessing the efficiency of the logistics center. To give a general idea, in addition to the amount Q , it is important to know how many military units are

serviced by the logistics center in question or the total number of automotive and armored vehicles it will service. From this point of view, *the average annual expenditure on maintenance and repairs provided by the logistics center per unit of equipment*, which acts as a relative economic indicator, can be considered more informative:

$$Q^* = \frac{Q}{N} = Q_1^* + Q_2^* + Q_3^* + Q_4^*, \tag{9}$$

where the formulas for calculating $Q_1^*, Q_2^*, Q_3^*, Q_4^*$ can be written separately as follows:

$$Q_1^* = \alpha_P \frac{P_E}{N} = \frac{\alpha_P}{N} (q_1 + l_0 \cdot q_0) \cdot p_0 = \alpha_P \frac{q_1 + l_0 \cdot q_0}{N} \cdot \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J m_j n_{ikj} h_{ikj} p_{ik},$$

$$Q_2^* = \alpha_P \frac{P_B + P_T}{N} =$$

$$= \frac{\alpha_P}{N} \{ 2 \cdot q_b \cdot \beta \cdot \sum_{s=1,2,\dots} [r_s \cdot \sum_{k=1}^2 \sum_{i \in H_s} p_{ik}] +$$

$$+ \sum_{s=1,2,\dots} [r_s \cdot (\sum_{i \in H_s^{(1)}} f_1 + \sum_{i \in H_s^{(2)}} f_2)] \} =$$

$$= \frac{\alpha_P}{N} \{ \sum_{s=1,2,\dots} [2q_b \beta r_s \cdot \sum_{i \in H_s} \sum_{k=1}^2 p_{ik}] +$$

$$+ \sum_{s=1,2,\dots} [r_s \cdot (\sum_{i \in H_s^{(1)}} f_1 + \sum_{i \in H_s^{(2)}} f_2)] \} =$$

$$= \frac{\alpha_P}{N} \{ \sum_{s=1,2,\dots} [r_s \cdot \sum_{i \in H_s} (2q_b \beta \cdot \sum_{k=1}^2 p_{ik})] +$$

$$+ \sum_{s=1,2,\dots} [r_s \cdot (\sum_{i \in H_s^{(1)}} f_1 + \sum_{i \in H_s^{(2)}} f_2)] \} =$$

$$= \frac{\alpha_P}{N} \sum_{s=1,2,\dots} \{ r_s \cdot (\sum_{i \in H_s^{(1)}} [f_1 + 2q_b \beta \sum_{k=1}^2 p_{ik}] +$$

$$+ \sum_{i \in H_s^{(2)}} [f_2 + 2q_b \beta \sum_{k=1}^2 p_{ik}]) \},$$

$$Q_3^* = \alpha_P \frac{P_H}{N} =$$

$$= \frac{\alpha_P}{N} \sum_{s=1,2,\dots} \{ q_s \cdot l_s \cdot \sum_{k=1}^2 \sum_{i \in H_s} \sum_{j=1}^J m_j n_{ikj} h_{ikj} p_{ik} \},$$

$$Q_4^* = \frac{R_A}{N} + \frac{\alpha_M}{N} [M_H + M_S + M_Z] =$$

$$= \frac{R_A}{N} + \frac{\alpha_M}{N} [M_H + \gamma_0 \cdot N_0 +$$

$$+ \sum_{i=1}^N (\gamma_1 \cdot p_{i3} + \gamma_2 \cdot p_{i4})].$$

Writing this indicator in the form of (9) shows how the maintenance costs of each unit of equipment depend on the road infrastructure in the area where the logistics center is located. Q_1^* is the costs of delivery of the movable property and spare parts from the central warehouse to the logistics center.

A reduction of these costs can be achieved by locating the logistics center near a transport hub. Q_2^* is the costs of transporting maintenance crews to military units for the maintenance of automotive and armored vehicles and depends on the distance from the logistics center to individual military units. Q_3^* is related to the delivery of spare parts to military units and can be minimized by selecting the optimal transportation route. It is clear that C and Q_4^* are actually independent of this infrastructure. If we take into account that the annual plans for operation and maintenance of automotive and armored vehicles are drawn up in such a way that each logistics center has

approximately equal workload over the years, then, with the exception of the quantities l_0, l_s, r_s ($s = 1, 2, \dots$), the remaining quantities can be considered constant.

This can ensure an efficient geographic location of the logistics center.

However, it should be noted that the choice of the location of the military logistics center requires the fulfillment of not only economic but also other factors, such as the requirements of environmental and military security; therefore, the proposed approach to choosing the location cannot be used independently.

Conclusions

Thus, an analysis of the structure of capital expenditure and operating expenses aimed at organizing a logistics center, as well as the military-economic indicators of this center, gives grounds to note the following results:

- the criterion of profitability, which is taken as a basis in civilian enterprises for assessing economic efficiency, cannot be determined when designing the location of a military logistics center in the area;
- the structure of capital expenditure and operating expenses associated with designing a logistics

center for the troops has been elaborated; the calculation method has been developed, taking into account the available resources, communications and infrastructure, information reflected in the annual plans for the operation and maintenance of automotive and armored vehicles of military units;

- the calculation methodology developed on the basis of the structure of capital expenditure and operating expenses on the organization of a logistics center also reflects the infrastructure indicators related to the geographic location of the center (the distance of the logistics center from the transport hub and the military units it services);

- the proposed method can be used to choose a geographic location that is favorable from the point of view of economic profitability for organizing a logistics center for the troops;

- using this method, it is possible to compare the economic aspects of various options of organizing military logistics;

- it is advisable to continue research in this area, since when locating a military logistics center, along with economic factors, it is important to also take into account environmental factors and factors of military security.

REFERENCES

1. Ruda, R.V. (2012), "An analysis of the effective operation of an enterprise: Necessity and methodology", *Visnyk Berdyans'koho universytetu menedzhmentu i biznesu*, No 4 (20), pp. 109-111 (in Ukrainian).
2. Lyubushin, N.P. (2017), *Comprehensive economic analysis of economic activity*, Textbook, YUNITI-DANA, Moscow, 448 p. (in Russian).
3. Balabanov I. and Sheremet A.D. (2019), *Theory of economic analysis*, Textbook; 564 p. (in Russian).
4. Vasileios Zeimpekis, George Kaimakamis and Nicholas J. Daras (2015), *Military Logistics. Research Advances and Future Trends*, Springer International Publishing Switzerland, 180 p.
5. (2012), *NATO Logistics Handbook*, November 2012, 256 p., available at: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/pdf_2016_03/20160303_2012-logistics_hndbk-ru.pdf.
6. Hari, Bucur-Marcu, Philip, Fluri and Todor, Tagarev (2011), *Defense Management: An Introduction. Security and Defense Management Series*, No. 1, Geneva – Kyiv, 212 p., available at: https://dcf.ch/sites/default/files/publications/documents/Book_Defense_rus.pdf
7. Sorin, Pinzaru and Costel-Dorel, Minea (2019), "The military units' logistic support principles", *Land Forces Academy Review*, Vol. XXIV, No 1(93), pp. 20-28, available at: https://www.researchgate.net/publication/332634985_The_Military_Units'_Logistic_Support_Principles.
8. Wan, Jiea and Wang, Wenb (2012), "Research on 6R Military Logistics Network", *Physics Procedia*, 33, pp. 678–684.
9. Shulman, A. (2008), *Military Logistics of the Israeli Army*, available at: <https://vpk-news.ru/articles/3846>.
10. Guliyev, B. (2021), "Investigation of the key factors related to the location of the logistics center in the troops", *Milli Təhlükəsizlik və Hərbi Elmlər*, Baku, No 1, pp. 60-66 (in Azerbaijani).
11. (2014), *Resolution of the Federal Agency of Construction, Housing and Housing Services of the Russian Federation* dated 05.03.2004 N 15/1 (revised on 16.06.2014) "On approval and implementation of the methodology for determining the cost of construction products in the Russian Federation" (together with "MDS 81-35.2004 ..."). March 2004 (in Russian).
12. Talibov, A.M. and Bayramov A.A. (2020), "The planning model of activity of the auto technical support system", *Modern trends of development of information and communication technologies and management tools*, Abstracts of the tenth international scientific and technical conference, Baku – Kharkiv – Žilina, Vol. 1: Sections 1, April 9–10, 2020, p.7.
13. Talibov, A.M. (2019), "Methodology for determining the location of warehouses in the logistics system of automotive technical support of the troops", *Hərbi icmal*, No 1, Baku, pp. 12-24 (in Azerbaijani).
14. Smirnov, I.M. and Kosareva, T.M. (2018), *Transport logistics. Study guide*, 224 p. (in Ukrainian), available at: <https://www.yakaboo.ua/transportna-logistika-navchalnij-posibnik.html>.
15. Ermolyev, Y.M., Lyashko, I.I., Mikhalevich, V.S. and Tyuptya, V.I. (1972), *Mathematical methods of operations research: Visshaya Shkola*, Kyiv, 312 p. (in Russian).
16. Seraya, O.V. (2007), "The fuzzy traveling salesman problem", *Matematicheskoye modelirovaniye*, No 2 (17), pp. 13-15 (in Russian).
17. Kolesnikov, A.V., Kirikov, I.A., Listopad, S.V., Rumovskaya, S.B. and Domanitsky, A.A. (2011), *Solving complex traveling salesman problems by methods of functional hybrid intelligent systems*, ed. A.V. Kolesnikov, IPI RAN, Moscow, 295 p. (in Russian).
18. Tarasenko, P.N. (2018), *Repair of military vehicles*, textbook, BNTU, Minsk, 258 p., available at: https://www.rep.bntu.by/Remont_voennoj_avtomobilnoj_tekhniki.

Received (Надійшла) 15.02.2021
Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.04.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Талібов Азіз Машалла – кандидат технічних наук, професор, старший науковий співробітник Інституту систем управління Національної академії наук Азербайджану, Баку, Азербайджан;
Aziz Mashalla Talibov – PhD, Candidate of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher of the Institute of Control Systems of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan;
e-mail: aziztalibov@mail.ru; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0572-7212>.

Гулієв Бахтіяр Вагіф – ад'юнкт Військової академії Збройних Сил, Баку, Азербайджан;
Bakhtiyar Vagif Guliyev – doctoral student, War College of Armed Forces of the Azerbaijan Republic Baku, Azerbaijan;
e-mail: bakhtiyar.guliyev@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1538-5092>.

Методика оцінки військово-економічних показників розташування логістичного центру при передислокації військ

А. М. Талібов, Б. В. Гулієв

Анотація. У статті пропонується методика оцінки економічної ефективності логістичного центру, що є невід'ємною частиною військової логістичної інфраструктури. Відзначається, що розробка цього методу заснована на оцінці економічної ефективності логістичного центру з урахуванням її надзвичайно високої функціональності і не враховує використання класичної рентабельності. У статті проаналізовано структуру капітальних вкладень на створення логістичного центру і виробничих витрат. В якості основних критеріїв виробничих витрат запропоновані витрати на обслуговування і ремонт кожної одиниці техніки, і обґрунтовані військово-економічні показники логістичного центру. Аналіз структури капітальних і операційних витрат на організацію логістичного центру, а також військово-економічних показників цього центру дає підставу відзначити наступні результати: критерій рентабельності, прийнятий за основу на цивільних підприємствах для оцінки економічної ефективності, не може бути визначений при проектуванні розміщення військово-логістичного центру на території; опрацьована структура капітальних і операційних витрат з проектування тилового центру для військ; методика розрахунку розроблена з урахуванням наявних ресурсів, комунікацій та інфраструктури, інформація відображається в річних планах експлуатації і технічного обслуговування автомобільної та бронетанкової техніки військових частин; методика розрахунку, розроблена на основі структури капітальних і операційних витрат на організацію логістичного центру, також відображає показники інфраструктури, пов'язані з географічним розташуванням центру (віддаленість логістичного центру від транспортного вузла і військової частини і служби); запропонований метод може бути використаний для вибору вигідного з точки зору економічної рентабельності географічного положення для організації логістичного центру військ; використовуючи цей метод, можна порівнювати економічні аспекти різних варіантів організації військової логістики.

Ключові слова: логістичний центр; логістична інфраструктура; склад запчастин; ремонтні площадки; структура операційних витрат; амортизаційні відрахування; структура капітальних витрат.

Методика оценки военно-экономических показателей расположения логистического центра при передислокации войск

А. М. Талибов, Б. В. Гулиев

Аннотация. В статье предлагается методика оценки экономической эффективности логистического центра, являющегося неотъемлемой частью военной логистической инфраструктуры. Отмечается, что разработка этой методики основана на оценке экономической эффективности логистического центра с учетом ее высшей степени функциональности и не учитывает использование классической рентабельности. В статье проанализирована структура капитальных вложений на создание логистического центра и производственных затрат. В качестве основных критериев производственных затрат предложены затраты на обслуживание и ремонт каждой единицы техники, и обоснованы военно-экономические показатели логистического центра. Анализ структуры капитальных и операционных затрат на организацию логистического центра, а также военно-экономических показателей этого центра дает основание отметить следующие результаты: проработана структура капитальных и операционных затрат по проектированию тылового центра для войск; методика расчета разработана с учетом имеющихся ресурсов, коммуникаций и инфраструктуры, информация отражается в годовых планах эксплуатации и технического обслуживания автомобильной и бронетанковой техники воинских частей; методика расчета, разработанная на основе структуры капитальных и операционных затрат на организацию логистического центра, также отражает показатели инфраструктуры, связанные с географическим расположением центра (удаленность логистического центра от транспортного узла и воинские части и службы); предложенный метод может быть использован для выбора выгодного с точки зрения экономической рентабельности географического положения для организации логистического центра войск; используя этот метод, можно сравнивать экономические аспекты различных вариантов организации военной логистики.

Ключевые слова: логистический центр; логистическая инфраструктура; склад запчастей; ремонтные площадки; структура операционных расходов; амортизационные отчисления; структура капитальных затрат.

В. М. Ткачов¹, А. А. Коваленко¹, Г. А. Кучук², Я. С. Ні¹

¹ Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

² Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

МЕТОД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИВУЧОСТІ ВИСОКОМОБІЛЬНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ

Анотація. В статті розглянуто особливості функціонування рухомих комп'ютерних мереж на базі малогабаритних літальних апаратів (високомобільні комп'ютерні мережі). Показано, що такі мережі, на відміну від стаціонарних або маломобільних, відрізняються низьким рівнем живучості при локальних пошкодженнях їх вузлів. **Метою** статті є розробка методу забезпечення живучості високомобільних комп'ютерних мереж в умовах деструктивного зовнішнього впливу, що призводить до локальної руйнації вузлів мережі або зв'язків між ними, з використанням методики оцінки живучості на всіх етапах функціонування мережі, шляхом зміни основної функції для реалізації всіх доступних стратегій функціонування мережі при визначенні критичних значень цілісності мережі та здатності її виконувати хоча б одну із доступних функцій. Отримані **результати** дозволяють: продовжити розвиток методики оцінки живучості комп'ютерних мереж в умовах деструктивного зовнішнього впливу; застосовувати розроблений метод для визначення критичних порогів живучості мережі відносно основної функції та зміни основної функції, відповідно до стратегій функціонування високомобільної мережі. Дослідження дозволяють зробити **висновки**, що запропонований метод може бути використаний на етапах проектування високомобільних комп'ютерних мереж, які характеризуються підвищеною живучістю та здатні функціонувати в умовах множинних локальних пошкоджень без катастрофічних руйнівних наслідків для структури мережі.

Ключові слова: живучість; комп'ютерна мережа; оцінка стану; реконфігурація; руйнівний вплив.

Вступ

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток технологічної бази та доступність малогабаритних роботизованих платформ дозволяють використовувати відомі ройові алгоритми для створення рухомих систем реєстрації, обміну, збереження даних, до складу яких входить група вузлів, які взаємодіють між собою за єдиною стратегією [1, 2]. Одним із класів таких рухомих мереж є безпроводні літаючі комп'ютерні мережі (FANET), також відомі як високомобільні комп'ютерні мережі (ВМКМ) [3]. Основне призначення таких мереж – організація передачі даних в умовах швидкого розгортання мережі передачі даних на деякій площі, збору (реєстрації) інформації від стаціонарних вузлів – центрів полігрових мереж, розгорнутих на місцевості тощо. Найбільш уживаними сферами застосування ВМКМ є агропромисловий комплекс, метеорологія, служби з надзвичайних ситуацій, військово-оборонна сфера тощо [4, 5].

Одним з важливих питань, які виникають під час експлуатації такого класу мереж – забезпечення надійного функціонування протягом заданого часу, тобто виконання основної функції з можливістю перебудови стратегії функціонування при зміні змісту основної функції. Тобто в рамках стратегії ВМКМ може бути як одна, так і декілька функцій, які виконує мережа. Одним із способів досягнення цієї мети є забезпечення живучості ВМКМ [6]. Деструктивними чинниками є зовнішній вплив на елементи (вузли) ВМКМ (електромагнітне ураження, температурні чинники, інші види деструктивного впливу), внутрішні чинники, спричинені наслідками деструктивного впливу та руйнації вузлів або зв'язків між ними у структурі ВМКМ [7, 8]. Іншими словами, забезпечення живучості як окремо взятого елемента ВМКМ, так і мережі в цілому – є актуальною задачею при виконанні мережею функцій в рамках стратегії її функ-

ціонування. Досягнення результату пов'язано з такими задачами як моніторинг та оцінка стану ВМКМ, заходів щодо підвищення живучості ВМКМ в екстремальних умовах або дії деструктивних чинників

Живучість ВМКМ може забезпечуватися шляхом реалізації ряду технічних та організаційних заходів. До технічних заходів відносяться – удосконалення топології ВМКМ, використання підсистем моніторингу стану вузлів та захисту ВМКМ від зовнішнього деструктивного впливу, використання процедур автоматичної реконфігурації мережі. До організаційних заходів можна віднести удосконалення системи керування ВМКМ в нормальному та екстремальних режимах, наявність резервних стратегій щодо ліквідації наслідків відмов ВМКМ в залежності від руйнації мережі та перспектив виконання основної функції.

Таким чином, актуальною є науково-прикладна проблема забезпечення живучості високомобільної комп'ютерної мережі в умовах деструктивного впливу на її елементи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [9] авторами представлені основні підходи для проведення кількісної оцінки живучості складних технічних систем, у тому числі, заснованих на оцінці співвідношення прямих та непрямих ризиків, співвідношення ймовірності катастрофічних відмов для систем різного рівня пошкодження. Авторами приведено приклад оцінки живучості технічних систем та обґрунтовано необхідність підвищення живучості для забезпечення безпеки складних технічних систем при екстремальних впливах. Однак, описаний підхід не може бути застосованим для мультифункціональних систем та мереж, коли основна функція може бути змінена в залежності від ступеню пошкодження системи або елементів. В такому випадку необхідне створення нової моделі та розрахунок її параметрів, на що не завжди є час. Тобто актуальність отриманих

розрахунків може бути втрачена у разі деградації системи та швидкої зміни її основної функції та визначення індексу живучості в залежності від нової функції. Іншими словами, мережа, як частина мегасистеми, яка в свою чергу має виконувати функції згідно глобальної стратегії, може мати наперед заданий набір функціональних задач, які можуть змінюватися в залежності від ступеню пошкодження системи або її елементів в рамках околу допустимих пошкоджень для виконання основної функції до досягнення нею критичного порогу.

У роботі [10] авторами представлено імітаційну модель і результати моделювання процесу функціонування транспортної мережі зв'язку спеціального призначення з використанням математичного апарату дискретних ланцюгів Маркова в умовах дестабілізуючих інформаційних впливів. На основі одержаних ймовірно-часових характеристик процесу функціонування транспортної мережі зв'язку спеціального призначення, які становлять основу для дослідження даного процесу при різних варіантах дестабілізуючого інформаційного впливу та відновлення об'єктів транспортної мережі зв'язку спеціального призначення, авторами визначено оцінки коефіцієнта оперативної готовності мережі в різних умовах обстановки. Однак, цей підхід не в повній мірі може описати можливу сценарну траєкторію функціонування вузлів системи, які, внаслідок катастрофічного руйнування мережі, продовжують функціонувати без зв'язків між собою.

Метою статті є розробка методу забезпечення живучості ВМКМ в умовах деструктивного зовнішнього впливу, що призводить до локальної руйнації вузлів або зв'язків між ними в ВМКМ та оцінка показника живучості такої мережі.

Основна частина

Оцінка живучості високомобільної комп'ютерної мережі. На першому етапі вирішення поставленої задачі є доцільним проведення оцінки живучості ВМКМ з метою визначення напрямів заходів, які можуть підвищити показники живучості мережі.

Функціонування більшості складних технічних систем визначається співвідношенням навантаження та несучої здатності [9]. Відповідно живучістю ВМКМ є здатність мережі пропускати та обробляти потоки даних, які перерозподіляються в мережі після того, як, в результаті екстремального впливу, пошкоджуються окремі її елементи (вузли або канали передачі даних).

Нехай ВМКМ задана у вигляді такого кортежу:

$$S = \langle s_1, s_2, \dots, s_n \rangle, \quad (1)$$

де s – елементи (вузли) ВМКМ, які виконують функції, відповідно до стратегії ВМКМ.

$$s = \langle f_1, f_2, \dots, f_k \rangle, \quad (2)$$

де f – функції, які виконує вузол ВМКМ: реєстрація, обробка інформації, тимчасове зберігання даних, їх передача. Функції можуть змінюватися в залежності від задачі яка ставиться вузлу.

Сутність відмови вузла ВМКМ полягає в тому, що він перестає виконувати одну або більше функцій, яка визначена для виконання у певний проміжок часу. Якщо вузол може виконувати інші функції (визначається шляхом періодичної самодіагностики), які в конкретний проміжок часу не затребувані, то вузол, де-факто, перебуває у режимі очікування.

Таким чином, відповідно до стратегії функціонування ВМКМ, відмова вузла ініціює додаткові взаємодії між іншими вузлами мережі, наприклад, перебудова топології або зміна схеми маршрутизації потоків даних. В такому випадку критерієм живучості ВМКМ можна назвати її здатність перерозподіляти потоки даних та продовжувати виконання заданих їй функцій після того, як окремі її вузли виходять з ладу або не можуть виконувати затребувану від них функцію.

Існує ряд відомих методів оцінки живучості технічних систем [6-9], але специфіка їх побудови визначається класом технічних систем. Оскільки реальні вузли і канали передачі даних ВМКМ мають обмежену пропускну здатність при побудові більш досконалих моделей мереж, необхідно враховувати потоки даних, які циркулюють в ВМКМ. У разі пошкодження вузла або зниження пропускну здатності каналу передачі даних, потік, який проходить через сегмент ВМКМ, перенаправляється альтернативними шляхами. Це може призвести до перевантаження інших вузлів або каналів, що може призвести до більш швидкої їх деградації. Таким чином, будь-яке локальне пошкодження ВМКМ може привести до подальшого перевантаження інших вузлів мережі та їх подальшою відмовою. Подібні каскадні процеси можуть стати причиною масштабної руйнації структури ВМКМ, навіть якщо вузли можуть виконувати інші функції, які, однак не затребувані в рамках поточної стратегії функціонування ВМКМ. Тобто, ВМКМ з малою живучістю втрачають здатність виконувати основну функцію стрімко та катастрофічно, що може призвести до каскадних порушень в роботі більш високорівневих систем, до складу яких вони входять, або які обслуговують.

Таким чином, важливо оцінити, при яких значеннях локальних пошкоджень ВМКМ може відбутися катастрофічне порушення в роботі мережі. Але живучість ВМКМ неможливо оцінити, незалежно від діючих в мережі систем моніторингу і керування, кваліфікації осіб, що приймають рішення, адекватності технічних регламентів та інструкцій, так як всі ці фактори впливають на можливість обмежувати локальні наслідки локальних пошкоджень і запобігти катастрофічному руйнуванню ВМКМ, якщо мережі були заподіяні локальні пошкодження. Руйнівний вплив на ВМКМ, який наносить локальні пошкодження мережі, можуть мати різноманітну природу. При цьому аналіз живучості не повинен залежати від ініціюючих подій.

Одним із підходів до оцінки стану мережі під час деструктивного впливу є побудова сценарних дерев [11]. Враховуючи ступінь автономності елементів структури, доцільним є використання багатозарового дерева (рис. 1), на якому відображено гіллясту структуру. Структура показує, що існують ймовір-

ності, які можуть призвести до повної непрацездатності вузла ВМКМ або обмеження виконання ним деяких функцій. При досягненні критичних значень за кількістю пошкоджених вузлів, ВМКМ може приймати рішення щодо зміни стратегії та, відповідно, сутності виконуваної функції. Тобто, при

$$\sum_{s_n} J_0^{G',K'} \geq L, \quad (3)$$

де L – критичне значення кількості вузлів ВМКМ, які можуть виконувати поточну функцію в рамках стратегії функціонування мережі; стратегія ВМКМ змінюється, відповідно до можливостей вузлів виконувати нову функцію. Ця можливість наперед тестується вузлами, що і формує підстави для прийняття рішення про зміну стратегії. Якщо жодна із можливих стратегій є недосяжною для виконання внаслідок катастрофічної руйнації ВМКМ, приймається рішення про евакуацію вузлів, при цьому ВМКМ перестає існувати як цілісна система, а кожний вузол функціонує як незалежна сутність.

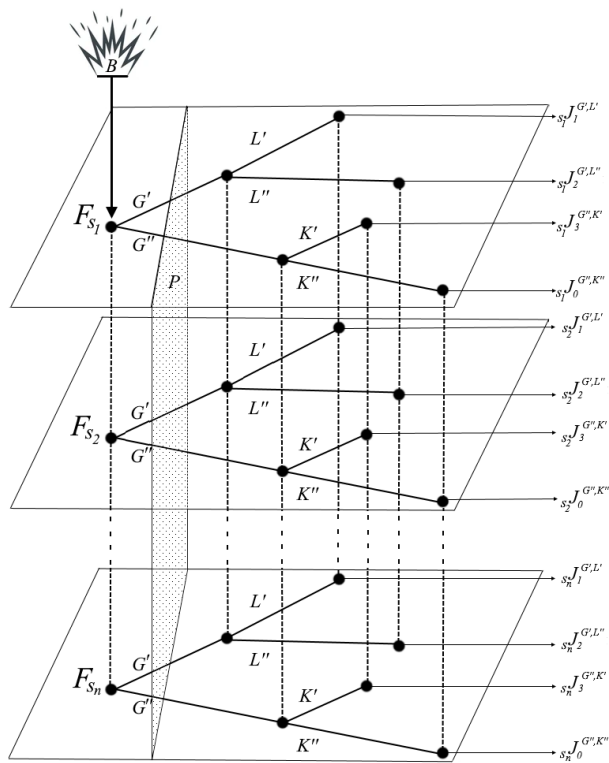


Рис. 1. Багатошарове сценарне дерево для ВМКМ, яка зазнає руйнівного впливу

Інші гілки дерева подій, наведені на рис. 1, показують, що накопичення значень вузлів у станах $s_n J_1^{G',L'}$, $s_n J_2^{G',L'}$, $s_n J_3^{G',K'}$ призводять до зміни стратегії функціонування ВМКМ, відповідно до правил, які задаються на етапі постановки задачі перед мережею. Виходячи з того, що показник надійності ВМКМ ξ_0 , яка не зазнавала деструктивного впливу буде визначатися як співвідношення математичного очікування до дисперсії, то показник надійності ВМКМ ξ_B , яка зазнала деструктивного впливу під час події B , – це співвідношення математичного спо-

дівання до середньоквадратичного відхилення запасу функціональності мережі. За таких визначень, індекс живучості за показником надійності, враховуючи [10], буде:

$$C = \xi_0 / \xi_B. \quad (4)$$

Виходячи зі структури дерева подій та враховуючи індекс живучості, заснований на співвідношенні ризиків прямих та непрямих збитків [10], оцінку живучості ВМКМ можна розрахувати як:

$$C_S = \frac{\int \int F_{S_n} q_{D|B}(\alpha | \beta) q_B(\alpha) d\beta d\alpha}{\int \int F_{S_n} q_{D|B}(\alpha | \beta) q_B(\alpha) d\beta d\alpha + \int \int F_{J_n} q_{D|B} P(G' | D = \beta) q_B(\alpha) d\beta d\alpha}, \quad (5)$$

де α, β – рівень деструктивного впливу і пошкодження елементів мережі; $q_B(\alpha)$ – щільність розподілу ймовірності деструктивного впливу.

У якості рішення задачі оцінки у даному вигляді можна використати метод Монте-Карло, а при модифікованих версіях ВМКМ при кількості вузлів менше п'яти – алгоритм імітації відпалу [12].

Для отримання більш точних оцінок живучості ВМКМ, необхідно удосконалити моделі ескалації аварій. Альтернативним підходом є використання простих моделей пошкодження мережі, які засновані на представленні мережі у вигляді графу. В такій постановці розглядаються, як правило, топологічні порушення в роботі ВМКМ, тобто вивчається вплив чинників на структуру мережі і, відповідно, розглядаються рішення реконфігурації топології мережі. Простота моделей пояснюється тим, що вузли мережі і канали передачі даних мережного графа можуть мати один з двох станів – робочий або неробочий. При цьому не враховується часовий фактор процесу розповсюдження пошкоджень і перерозподілу потоків. В такій моделі розповсюдження аварій – живучість ВМКМ може характеризуватися залежністю ступеня виконання мережею заданих функціональних обов'язків (рівня функціональності мережі) від кількості видалених вузлів або ребер (каналів передачі даних).

Забезпечення живучості високомобільної комп'ютерної мережі. Виділяється два напрями рішення по зниженню ймовірності відмови ВМКМ: підвищення надійності її елементів та підвищення стійкості до локальних пошкоджень. Однак, запас живучості ВМКМ може бути недостатнім, щоб чинити опір катастрофічним руйнаціям мережі після нанесення їй локальних пошкоджень. Руйнації такого характеру найчастіше можуть виникати в ВМКМ з високим показником надмірності за рахунок позитивних зворотних зав'язків.

Аналіз та оцінка живучості ВМКМ показує, що до відмови ВМКМ призводять ланцюг подій, який складається з: екстремального впливу на мережу; локального пошкодження елементів мережі; ескалація аварійного процесу, що призводить до ініціювання вторинних та каскадних відмов решти елементів мережі, та завершується відмовою мережі в цілому.

В існуючих рішеннях лежить визначення ймовірності виникнення екстремального впливу та конструктивний алгоритм, спрямований на підвищення живучості, щоб запобігти катастрофічним явищам руйнації ВМКМ [10, 11].

Існує велика кількість підходів до визначення ймовірності виникнення екстремального впливу, наприклад методи прогнозування, теорія випадкових процесів тощо [12], які добре себе зарекомендували.

Відповідно, пропонується новий підхід, який можна описати такою послідовністю кроків.

Крок 1. На початку планування роботи ВМКМ визначаються всі можливі стратегії та/або функції, які може виконувати ВМКМ, визначається мінімальний поріг цілісності структури мережі, який дозволяє виконувати задану функцію.

Крок 2. Власне, ВМКМ виконує задану їй функцію, відповідно до стратегії. Під час виконання відбувається моніторинг стану вузлів мережі, їх діагностика та самодіагностика. Нормальний режим функціонування характеризується відсутністю локальних пошкоджень ВМКМ та інформації про ймовірні пошкодження у найближчій перспективі.

Крок 3. У разі виникнення внутрішнього або зовнішнього впливу, який унеможливує, або частково обмежує виконання вузлами ВМКМ поставлених задач, відбувається оцінка можливості виконання основної функції мережею в цілому.

Ймовірність відмови ВМКМ можна визначити, використовуючи [10]:

$$P[S] = \{W_s\} \times [W_c] \times \{B\}, \quad (6)$$

де $\{W_s\}$ – вектор вразливості структури ВМКМ, який складається з умовних ймовірностей відмови мережі внаслідок локальних пошкоджень; $[W_c]$ – матриця локальної вразливості ВМКМ, яка складається з умовних ймовірностей локальних пошкоджень ВМКМ при різних руйнівних факторах впливу на мережу; $\{B\}$ – вектор загроз, який складається з ймовірностей виникнення та протікання різних руйнівних впливів.

Крок 4. Відповідно до заданих на початковому етапі критичних значень та результатів моніторингу стану структури ВМКМ та стану її вузлів, можуть прийматися наступні рішення: продовження виконання основної функції, діагностика ВМКМ щодо можливості виконання іншої функції, відповідно до пулу стратегій, зміна основної функції, евакуація вузлів ВМКМ, яка зазнала катастрофічної руйнації.

Крок 5. У разі зміни основної функції, відбувається реконфігурація вузлів ВМКМ, за необхідності, перебудовується схема маршрутизації потоків даних, встановлюється поріг цінності інформації, що реєструється.

Крок 6. Після виконання останньої функції, яка була визначена для ВМКМ, згідно алгоритмів, які задають стратегію функціонування ВМКМ, вузли мережі можуть: повернутися в точку постійного базування, самознищитися, знищити критично важливу інформацію, яка знаходиться на носію даних вузла, якщо стратегія не містить задачі повернення вузла.

Модельний експеримент. Розглянемо один із прикладів забезпечення живучості ВМКМ з використанням підходу, який запропоновано в роботі.

Нехай існує деяка ВМКМ S , яка складається з сукупності вузлів s_n , де $n = 1, 2, \dots, 16$ та каналів передачі даних між ними, виконує основну функцію реєстрації інформації на певній ділянці, яка характеризується високою ймовірністю виникнення деструктивних явищ B (рис. 2). При цьому вузли ВМКМ виконують функції, пов'язані з реєстрацією інформації f_1 , перетворенням (стисненням) f_2 , тимчасовим зберіганням f_3 , та передачею f_4 .

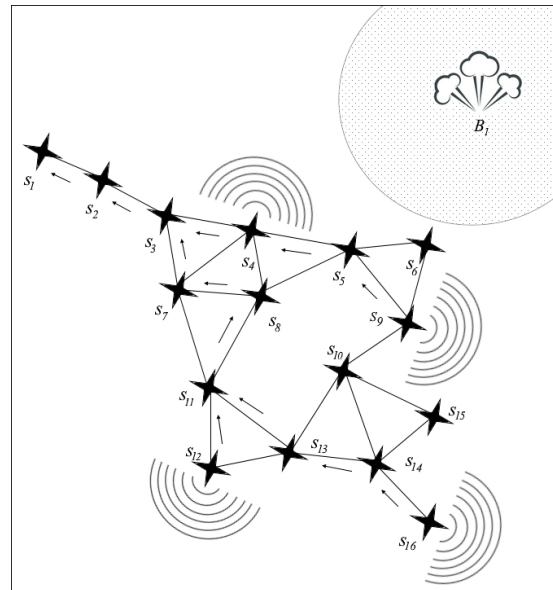


Рис. 2. Приклад ВМКМ, яка виконує функцію реєстрації інформації (зондування земної поверхні)

У деякий момент часу t_B виникає руйнівне явище B_1 , яке має високу швидкість поширення та протягом коротко часу досягає вузлів ВМКМ (рис. 3).

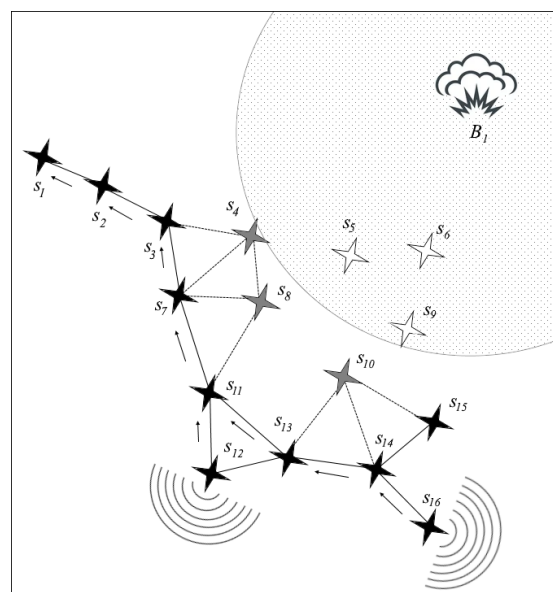


Рис. 3. Вплив руйнівного чинника на функціонування ВМКМ

Частина вузлів, під впливом такого впливу, втрачають свою функціональність та перестають бути частиною структури ВМКМ (s_5, s_6, s_9), тоді як вузли s_4, s_8, s_{10}, s_{15} отримують локальні пошкодження та не можуть виконувати поточну функцію реєстрації інформації. Матриця стану вузлів, можливості виконання ними функції щоразу оновлюється, тому ВМКМ завжди має представлення про свою структурну цілісність та можливість функціонування за визначеною стратегією.

Припустимо, через деякий час, деструктивний вплив B_1 набув свого пікового значення, вивівши з ладу частину вузлів високомобільних комп'ютерних мереж та у цей час виник інший чинник B_2 . Оцінка живучості та дерево подій, розглянуті вище, є підставою ініціювати перегляд стратегії функціонування ВМКМ.

Таким чином, перевизначається основні функція, а вузли ВМКМ реконфігуруються та починають виконувати нову функцію f_1' замість f_1 (рис. 4).

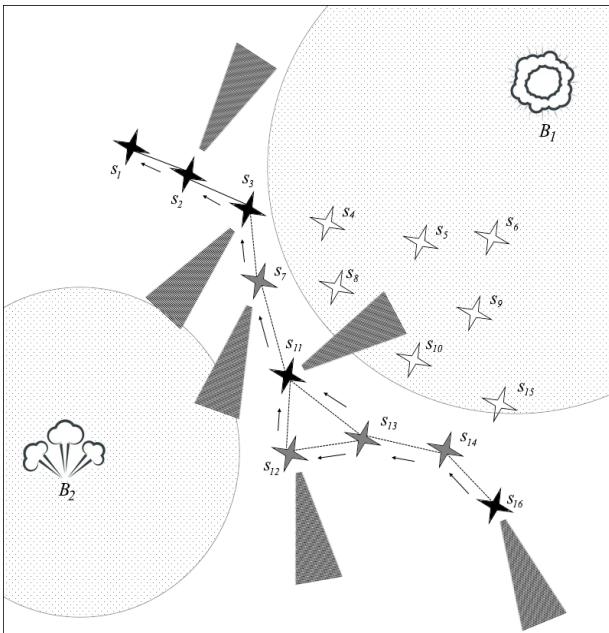


Рис. 4. Приклад реконфігурації ВМКМ – змінено спосіб реєстрації інформації

Результати модельного експерименту представлені у табл. 1.

Результати показують, за яких порогових значеннях відбувається перевизначення функцій, відповідно до нової стратегії та індекс живучості мережі з урахуванням (5).

Таким чином, модельний експеримент демонструє, що використання запропонованого методу дозволяє підвищити живучість високомобільних комп'ютерних мереж шляхом зміни основної функції на підставі даних моніторингу про деструктивний вплив на вузли. При цьому локальні пошкодження ВМКМ у вигляді виходу з ладу окремих її вузлів не спричиняють катастрофічної руйнації, про що свідчать теоретична оцінка показника живучості високомобільних комп'ютерних мереж.

Таблиця 1 – Результати модельного експерименту

Вузол	Функціональна траєкторія
s_1	$\{f_4 t_1\} \rightarrow \{f_4 t_2\} \rightarrow \{f_4 t_3\}$
s_2	$\{f_4 t_1\} \rightarrow \{f_4 t_2\} \rightarrow \{(f_4, f_1') t_3\}$
s_3	$\{f_4 t_1\} \rightarrow \{f_4 t_2\} \rightarrow \{(f_4, f_1') t_3\}$
s_4	$\{(f_4, f_1) t_1\} \rightarrow \{f_3 t_2\} \rightarrow \{0 t_3\}$
s_5	$\{f_4 t_1\} \rightarrow \{0 t_2\} \rightarrow \{0 t_3\}$
s_6	$\{f_4 t_1\} \rightarrow \{0 t_2\} \rightarrow \{0 t_3\}$
s_7	$\{f_4 t_1\} \rightarrow \{f_4 t_2\} \rightarrow \{(f_4, f_3, f_1') t_3\}$
s_8	$\{f_4 t_1\} \rightarrow \{f_3 t_2\} \rightarrow \{0 t_3\}$
s_9	$\{(f_4, f_1) t_1\} \rightarrow \{0 t_2\} \rightarrow \{0 t_3\}$
s_{10}	$\{1 t_1\} \rightarrow \{0 t_2\} \rightarrow \{0 t_3\}$
s_{11}	$\{f_4 t_1\} \rightarrow \{f_4 t_2\} \rightarrow \{(f_4, f_1') t_3\}$
s_{12}	$\{(f_4, f_1) t_1\} \rightarrow \{(f_4, f_1) t_2\} \rightarrow \{(f_4, f_3, f_1') t_3\}$
s_{13}	$\{f_4 t_1\} \rightarrow \{f_4 t_2\} \rightarrow \{(f_4, f_3) t_3\}$
s_{14}	$\{f_4 t_1\} \rightarrow \{f_4 t_2\} \rightarrow \{(f_4, f_3) t_3\}$
s_{15}	$\{1 t_1\} \rightarrow \{1 t_2\} \rightarrow \{0 t_3\}$
s_{16}	$\{(f_4, f_1) t_1\} \rightarrow \{(f_4, f_1) t_2\} \rightarrow \{(f_4, f_1') t_3\}$

Висновки

В результаті проведеної роботи поставлена і успішно вирішена науково-прикладна задача розробки методу, який дозволяє забезпечити живучість високомобільної комп'ютерної мережі, призначеної для функціонування в екстремальних умовах з рядом чинників, які можуть чинити локальній пошкодження мережі, шляхом механізму визначення порогових значень неможливості виконання основної функції та її зміни для реалізації всіх доступних стратегій функціонування мережі при визначенні критичних значень цілісності мережі та здатності її виконувати хоча б одну із доступних функцій, які задаються на початковому етапі. Метод включає в себе оцінку живучості ВМКМ в нормальному та екстремальному режимах функціонування, організаційні заходи. Зокрема, досягнуто такі результати:

- сформульована науково-прикладна задача забезпечення живучості високомобільної комп'ютерної мережі;
- отримала подальший розвиток методика оцінки живучості комп'ютерних мереж в умовах деструктивного зовнішнього впливу;
- розроблено метод визначення критичних порогів живучості мережі відносно основної функції та зміни основної функції, відповідно до стратегій функціонування ВМКМ;
- проведено модельні експерименти з дослідженням ефективності використання розробленого методу.

Запропонований метод може бути використаний при на етапах планування використання високомобільних комп'ютерних мереж в середовищі з високою ймовірністю деструктивних впливів на елементи

мережі для розробки спеціальних стратегій функціонування мережі з метою збереження накопичених даних, вчасної передачі та цілісності елементів мережі.

У якості подальшої дослідницької роботи за даним напрямком пропонується провести експериментальні дослідження на базі реального обладнання з метою пошуку нових закономірностей, які неможливо або вкрай складно передбачити внаслідок деградації

апаратної складової під час нормального функціонування високомобільних комп'ютерних мереж протягом тривалого часу [13], а також є необхідним для більш повного розуміння траєкторій гілок сценарного дерева, застосувати інші алгоритмічні підходи, такі як метод невизначених множників Лагранжа при розрахунку порогових значень, коли необхідно виконувати реконфігурацію вузлів [14].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Яровий О. В. Системи управління безпілотними літальними апаратами для здійснення моніторингу наземних об'єктів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. Вип. 3 (49). С. 33-38. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.3.033>.
2. Харченко В. С., Ястребенецкий М. А., Фесенко Г. В., Саченко А. А., Кочан В. В. Система послеварийного моніторингу АЭС с использованием БПЛА: модели надежности. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2017. № 4. С. 50-55.
3. Talak R., Karaman S., Modiano E. Capacity and delay scaling for broadcast transmission in highly mobile wireless networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2019. 19(9). P. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1145/3084041.3084045>.
4. Nagchaudhuri A., Mitra M., Hartman C., Ford T., Pandya J. Mobile Robotic Platforms to Support Smart Farming Efforts at UMES. *2018 14th IEEE/ASME Int. Conf. on Mechatronic and Emb. Systems and Appl. (MESA)*. 2018, July. P. 1-7. IEEE.
5. Alghamdi Y., Munir A., La H. M. Architecture, Classification, and Applications of Contemporary Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Consumer Electronics Magazine*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCE.2021.3063945>.
6. Додонов А. Г., Ландэ Д. В. Живучесть информационных систем. Киев : Наук. думка, 2011. 256 с.
7. Ruban I. V., Churyumov G. I., Tokarev V. V., Tkachov V. M. Provision of Survivability of Reconfigurable Mobile System on Exposure to High-Power Electromagnetic Radiation. *Selected Papers of the XVII Int. Scientific and Practical Conf. on Information Technologies and Security (ITS 2017)*. CEUR Workshop Processing, Kyiv, Ukraine, November 30, 2017. Pp. 105-111.
8. Churyumov G., Tokarev V., Tkachov V., Partyka S. Scenario of interaction of the mobile technical objects in the process of transmission of data streams in conditions of impacting the powerful electromagnetic field. *2018 IEEE second international conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*. 2018, August. P. 183-186. IEEE.
9. Махутов Н. А., Петров В. П., Резников Д. О. Оценка живучести сложных технических систем. *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2009. № 3. С. 47-66.
10. Канаев А. К., Муравцов А. А., Субботин Д. В., Ефремов С. П. Модели функционирования транспортной сети связи специального назначения с учетом динамического изменения структуры сети в условиях дестабилизирующих информационных воздействий. *Вопросы оборонной техники*. Серия 16. 2019. № 7-8. С. 90-98.
11. Махутов Н. А., Резников Д. О. Оценка уязвимости технических систем и ее место в процедуре анализа риска. *Проблемы анализа риска*. 2008. Т. 5, № 3. С. 72-85.
12. Кошевой Н. Д., Бельмега А. В., Чистикова З. Э. Применение алгоритма имитации отжига для оптимизации многофакторных планов эксперимента. *Системи обробки інформації*. 2015. № 6. С. 103-106.
13. Ткачов В. М., Мігін Д. С., Дух Я. В. Підвищення живучості мережної складової рою БПЛА. *Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі*. Мат. XI Всеукраїнської науково-практичної WEB конференції аспірантів, студентів та молодих вчених (21-23 березня 2018 р.). Кривий Ріг: ДВНЗ «Криворізький національний університет», 2018. С. 98-100.
14. Kovalenko A., Kuchuk H., Tkachov V. Method of ensuring the survivability of computer network on the basis of VPN-tunneling. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. Вип. 1 (63). С. 90-95. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.1.090>.

REFERENCES

1. Yarovi, O. (2018), "Systems of management of unavailable flighting apparatus for implementation of monitoring of ground object", *Control, Navigation and Communication Systems*, Is. 1(49), pp. 33-38. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.3.033>.
2. Kharchenko, V. S., Yastrebenetskiy, M. A., Fesenko, G. V., Sachenko, A. A. and Kochan, V. V. (2017), "System of NPP post-accident monitoring using UAVs: reliability models", *Nuclear and radioactive safety*, No. 4, pp. 50-55.
3. Talak, R., Karaman, S. and Modiano, E. (2019), "Capacity and delay scaling for broadcast transmission in highly mobile wireless networks", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 19(9), pp 1-10, DOI: <https://doi.org/10.1145/3084041.3084045>.
4. Nagchaudhuri, A., Mitra, M., Hartman, C., Ford, T. and Pandya, J. (2018), "Mobile Robotic Platforms to Support Smart Farming Efforts at UMES", *2018 14th IEEE/ASME Int. Conf. on Mechatronic and Emb. Systems and Appl. (MESA)*, pp. 1-7.
5. Alghamdi, Y., Munir, A. and La, H. M. (2021), "Architecture, Classification, and Applications of Contemporary Unmanned Aerial Vehicles", *IEEE Consumer Electronics Magazine*, DOI: <https://doi.org/10.1109/MCE.2021.3063945>.
6. Dodonov A.G. and Lande, D.W. (2011), *Information Systems Survivability*, Nauk. dumka, Kyiv, 256 p.
7. Ruban, I. V., Churyumov, G. I., Tokarev, V. V. and Tkachov, V. M. (2017), "Provision of Survivability of Reconfigurable Mobile System on Exposure to High-Power Electromagnetic Radiation", *Selected Papers of the XVII Int. Scientific and Practical Conf. on Information Technologies and Security (ITS 2017)*, CEUR Workshop Processing, Kyiv, Ukraine, pp. 105-111.
8. Churyumov, G., Tokarev, V., Tkachov, V. and Partyka, S. (2018), "Scenario of interaction of the mobile technical objects in the process of transmission of data streams in conditions of impacting the powerful electromagnetic field", *2018 IEEE second international conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*, pp. 183-186, IEEE.
9. Makhutov, N.A., Petrov V.P. and Reznikov, D.O. (2009), "Assessment of the survivability of complex technical systems", *Problems of safety and emergency situations*, no. 3, pp. 47-66.
10. Kanaev, A.K., Muravtsov, A.A., Subbotin, D.V. and Efremov, S.P. (2019), "Models of the functioning of a special-purpose communication transport network, taking into account the dynamic changes in the structure of the network in conditions of destabilizing information influences", *Problems of defense technology*, Series 16, No. 7-8, pp. 90-98.
11. Makhutov, N.A. and Reznikov, D.O. (2008), "Assessing the vulnerability of technical systems and its place in the risk analysis procedure", *Problems of risk analysis*, vol 5, no. 3, pp. 72-85.

12. Koshevoy, N.D., Belmega, A.V. and Chistikova, Z.E. (2015), "Application of the simulated annealing algorithm for optimization of multivariate experimental designs", *Information processing systems*, No. 6, pp. 103-106.
13. Tkachov, V.M., Mitin, D.E. and Spirit, J.W. (2018), "Improving the survivability of the network component of the UAV swarm", *Computer Intelligent Systems and Networks*, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, pp. 98-100.
14. Kovalenko, A., Kuchuk, H. and Tkachov, V. (2021), "Method of ensuring the survivability of the computer network based on VPN-tunneling", *Control, Navigation and Communication Systems*, Is. 1(63), pp. 90-95. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.1.090>.

Received (Надійшла) 15.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.04.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Ткачов Віталій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Vitalii Tkachov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: vitalii.tkachov@nure.ua, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6524-9937>.

Коваленко Андрій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Andriy Kovalenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: andriy.kovalenko@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2817-9036>.

Кучук Георгій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Heorhii Kuchuk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Computer Science and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: kuchuk56@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2862-438X>.

Ні Яна Самвелівна – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Iana Ni – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: yana.movsesian@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1352-700X>.

Метод обеспечения живучести высококомбинированной компьютерной сети

В. Н. Ткачев, А. А. Коваленко, Г. А. Кучук, Я. С. Ни

Аннотация. В статье рассмотрены особенности функционирования подвижных компьютерных сетей на базе малогабаритных летательных аппаратов (высокомобильные компьютерные сети). Показано, что такие сети, в отличие от стационарных или маломобильных, отличаются низким уровнем живучести при локальных повреждениях их узлов. **Целью статьи** является разработка метода обеспечения живучести высококомбинированных компьютерных сетей в условиях деструктивного внешнего воздействия, что приводит к локальному разрушению узлов сети или связей между ними, с использованием методики оценки живучести на всех этапах функционирования сети, путем изменения основной функции для реализации всех доступных стратегий функционированием сети при определении критических значений целостности сети и способности ее выполнять хотя бы одну из доступных функций. **Полученные результаты** позволяют: продолжить развитие методики оценки живучести компьютерных сетей в условиях деструктивного внешнего воздействия; применять разработанный метод для определения критических порогов живучести сети относительно основной функции и изменения основной функции, согласно со стратегией функционированием высококомбинированных сетей. Исследования позволяют сделать выводы, что предложенный метод может быть использован на этапах проектирования высококомбинированных компьютерных сетей, характеризующихся повышенной живучестью и способных функционировать в условиях множественных локальных повреждений без катастрофических разрушительных последствий для структуры сети.

Ключевые слова: живучесть; компьютерная сеть; оценка состояния; реконфигурация; разрушительное воздействие.

Method of ensuring the survivability of highly mobile computer networks

Vitalii Tkachov, Andriy Kovalenko, Heorhii Kuchuk, Iana Ni

Abstract. The article discusses the features of the functioning of mobile computer networks based on small-sized aircraft (highly mobile computer networks). It is shown that such networks, in contrast to stationary or low-mobile ones, have a low level of survivability in case of local damage to their nodes. **The purpose of the article** is to develop a method for ensuring the survivability of highly mobile computer networks under conditions of destructive external influences, which leads to local destruction of network nodes or links between them, using the method of assessing survivability at all stages of network functioning, by changing the main function to implement all available strategies for the functioning of the network when determining the critical values of the integrity of the network and its ability to perform at least one of the available functions. The results obtained allow: to continue the development of theoretical research in the development of strategies for managing highly mobile computer networks in extreme situations; to develop an applied solution to ensure the survivability of highly mobile computer networks by building multifunctional or redundant structures, increasing the value of their redundancy. The studies allow us to **conclude** that the proposed method can be used at the design stages of highly mobile computer networks, characterized by increased survivability and capable of functioning in conditions of multiple local damages without catastrophic destructive consequences for the network structure.

Keywords: survivability; computer network; condition assessment; reconfiguration; destructive impact.