



Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"



Сучасні Інформаційні системи

Advanced Information Systems

Sučasni informacijni sistemi

Том 6, № 1

Volume 6, No. 1

**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 04 лютого 2022 року № 2).*

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 • 2022

Редакційна колегія

Головний редактор:

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

Заступник головного редактора:

ЗАКОВОРОТНИЙ Олександр Юрійович
(*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*);
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., Ербіль, 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 Балаїї Баласубраманіан
(*PhD, доц., Ербіль, Ірак*);
СЕМЕНОВ Сергій Геннадійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
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:
ПОДОРІЖНЯК 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:

Oleksandr Zakovorotniy
(*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*);
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*);
Serhii SEMENOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
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 PODOROZHNIAK
(*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

- Гороховатський В. О., Стяглик Н. І.,
Жадан О. В.*
Застосування багатокомпонентної моделі даних
для описів класів у задачі класифікації зображень 5
- Челак В. В., Гавриленко С. Ю.*
Метод ідентифікації стану комп'ютерної системи
на основі boosting ансамблю з спеціальною
процедурою передобробки даних (eng.) 12

МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

- Барабаш О. В., Бандурка О. І.*
Моделювання лісових пожеж на основі прогностичної
моделі Байєса та геоінформаційних технологій 19
- Проценко А. А., Іванов В. Г.*
Використання додатку E-NetSim при візуальному
моделюванні руху автономних роботів (eng.) 27

МЕТОДИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ

- Колумбет В. П., Свинчук О. В.*
Мультиагентні методи управління розподіленими
обчисленнями у гібридних кластерах (eng.) 32
- Калінін Є. І., Лисиця Д. О.,
Нечаусов А. С., Криховецький Г. Я.*
Асимптотика системи оптимального управління
з двома малими сингулярно-збуджуючими параметрами 37

МЕТОДИ СИНТЕЗУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

- Краснобаєв В. А., Кошман С. О.,
Ковальчук Д. М.*
Концепція виконання операції додавання
у системі залишкових класів (eng.) 43

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

- Барковська О. Ю., Холєв В. О.,
Литвиненко В. С.*
Вивчення методів зниження шуму в звуковому ряді
для вирішення задач перетворення мови в текст (eng.) 48
- Гапон Д. А., Зуєв А. О.,
Качанов П. О., Кубрик Б. І.*
Визначення джерела вищих гармонік у системах
електропостачання зі змішаним навантаженням 55
- Ібрагімов Б. Р., Гашимов Е. Г.,
Талібов А. М., Гасанов А. Г.*
Дослідження та аналіз показників
волоконно-оптичних ліній зв'язку
з використанням спектральних технологій (eng.) 61
- Коваленко А. А., Порошенко А. І.*
Аналіз методів та систем детектування аудіоподій (eng.) 65
- Раскін Л. Г., Святкін Я. В.,
Іванчихін Ю. В., Корсун Р. О.*
Напівмарковські моделі надійності (eng.) 70

TABLE OF CONTENTS

PROBLEMS OF IDENTIFICATION IN INFORMATION SYSTEMS

- Volodymyr Gorokhovatskyi, Natalia Stiahlyk,
Oleksii Zhadan*
Application of multi-component data model for class
descriptions in the image classification problem (ukr) 5
- Viktor Chelak, Svitlana Gavrylenko*
Method of computer system state identification
based on boosting ensemble with special
preprocessing procedure 12

INFORMATION SYSTEMS MODELING

- Oleg Barabash, Olena Bandurka*
Modeling of forest fires based on the Bayesian forecast
model and geoinformation technologies (ukr) 19
- Andrii Protsenko, Valeriy Ivanov*
Using the E-NetSim application for visual simulation
of the movement of the autonomous robots (ukr) 27

ADAPTIVE CONTROL METHODS

- Vadim Kolumbet, Olha Svychnuk*
Multiagent methods of management
of distributed computing in hybrid clusters 32
- Yevhen Kalinin, Dmytro Lysytsia,
Artem Nechausov, Heorhii Krykhovetskyi*
Asymptotic behavior of an optimal control system
with two small singularly excitatory parameters (ukr) 37

METHODS OF INFORMATION SYSTEMS SYNTHESIS

- Victor Krasnobayev, Sergey Koshman,
Dmytro Kovalchuk*
The concept of performing the addition operation
in the system of residual classes 43

INFORMATION SYSTEMS RESEARCH

- Olesia Barkovska, Vladyslav Kholiev,
Vladyslav Lytyynenko*
Study of noise reduction methods in the sound sequence
when solving the speech-to-text problem 48
- Dmytro Gapon, Andrey Zuev,
Petro Качанов, Boris Kubrik*
Determination of higher harmonics source
in mixed-load power supply systems (ukr) 55
- Bayram Ibrahimov, Elshan Hashimov,
Aziz Talibov, Arif Hasanov*
Research and analysis indicators
fiber-optic communication lines
using spectral technologies 61
- Andriy Kovalenko, Anton Poroshenko*
Analysis of the sound event detection methods and systems 65
- Lev Raskin, Iaroslav Sviatkin,
Yuriy Ivanchikhin, Roman Korsun*
Semi-markov reliability models 70

<i>Тверитникова О. Є., Дроздова Т. В., Демідова Ю. Є., Кузьменко Н. О.</i> Метрологічне забезпечення пульсоксиметрів (eng.) 75	<i>Elena Tverytnykova, Tatyana Drozdova, Yulia Demidova, Nataliia Kuzmenko</i> Metrological support of pulse oximeters 75
<i>Штаненко С. С., Самохвалов Ю. Я., Іохов О. Ю., Малюк В. Г.</i> Мікропроцесорні системи на програмованих логічних інтегральних схемах як об'єкт діагностики 81	<i>Serhii Shtanenko, Yurii Samokhvalov, Oleksandr Iohov, Victor Maliuk</i> Microprocessor systems based on programmable logic devices as an object of diagnostics (ukr) 81
МЕТОДИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ	METHODS OF INFORMATION SYSTEMS PROTECTION
<i>Волошин Д. Г., Бульба С. С.</i> Інтелектуальний метод визначення спуфінгу БПЛА 88	<i>Denys Voloshyn, Serhii Bulba</i> Intelligent method of determining UAV spoofing (ukr) 88
<i>Ліцян Чжан, Мірошніченко Н. М.</i> Розробка методу підтримки прийняття рішення про безпеку програмного забезпечення (eng.) 97	<i>Zhang Liqiang, Nataliia Miroshnichenko</i> The software security decision support method development 97
ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ	APPLIED PROBLEMS OF INFORMATION SYSTEMS OPERATION
<i>Гадецька С. В., Дубницький В. Ю., Кушнерук Ю. І., Ходирєв О. І.</i> Виконання основних арифметичних дій з комплексними числами, які представлено в інтервальній гіперболічній формі 104	<i>Svitlana Gadetska, Valeriy Dubnitskiy, Yuriy Kushneruk, Alexander Khodyrev</i> Performance of basic arithmetic actions with complex numbers, which are presented in interval hyperbolic form (ukr) 104
<i>Гайдар Н. К., Заволодько Г. Е., Пустовойтов П. Є.</i> Процес 3D друку в онлайн-освіті (eng.) 114	<i>Nataliia Haidar, Ganna Zavalodko, Pavlo Pustovoitov</i> Process of 3D printing in online education 114
<i>Рубан І. В., Бологова Н. М., Мартовицький В. О.</i> Інформаційна технологія підтвердження права власності на цифрові зображення 118	<i>Igor Ruban, Nataliia Bolohova, Vitalii Martovytskyi</i> Information technology for confirming property rights to digital images (ukr) 118
<i>Серков А. А., Бреславець В. С., Бреславець Ю. В., Яковенко І. В.</i> Порушення власних коливання напівпровідникових ком- плектуючих радіовиробів підприємства стороннього електромагнітного випромінювання (eng.) 124	<i>Aleksandr Serkov, Vitalii Breslavets, Juliya Breslavets, Igor Yakovenko</i> Excitation of own oscillations in semiconductor components of radio products under the exposure of third-party electromagnetic radiation 124
<i>Смірнова Т. В., Буравченко К. О., Щербань А. В., Багдасарян Е. К., Коваленко А. С.</i> Проектування та оптимізація структурованих кабельних систем для автоматизації виробничих процесів підприємства 129	<i>Tetiana Smirnova, Kostiantyn Buravchenko, Andrii Shcherban, Eduard Bahdasarian, Anna Kovalenko</i> Design and optimization of structured cables systems for automation of production processes of the enterprise (ukr) 129
Алфавітний покажчик 134	Alphabetical index 134

✦

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

Географія статей цього номера



Азербайджан
Azerbaijan



Китай
China



Україна
Ukraine

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Багдасарян Е. К. (Eduard Bahdasarian)	129	Корсун Р. О. (Roman Korsun)	70
Бандурка О. І. (Olena Bandurka)	19	Кошман С. О. (Sergey Koshman)	43
Барабаш О. В. (Oleg Barabash)	19	Краснобаєв В. А. (Victor Krasnobayev)	43
Барковська О. Ю. (Olesia Barkovska)	48	Криховецький Г. Я. (Heorhii Krykhovetskyi)	37
Бологова Н. М. (Nataliia Bolohova)	118	Кубрик Б. І. (Boris Kubrik)	55
Бреславець В. С. (Vitalii Breslavets)	124	Кузьменко Н. О. (Nataliia Kuzmenko)	75
Бреславець Ю. В. (Juliya Breslavets)	124	Кушнерук Ю. І. (Yuriy Kushneruk)	116
Бульба С. С. (Serhii Bulba)	88	Лисиця Д. О. (Dmytro Lysytsia)	37
Буравченко К. О. (Kostiantyn Buravchenko)	129	Литвиненко В. С. (Vladyslav Lytvynenko)	48
Волошин Д. Г. (Denys Voloshyn)	88	Ліцян Чжан (Zhang Liqiang)	97
Гавриленко С. Ю. (Svitlana Gavrylenko)	12	Малюк В. Г. (Victor Maliuk)	81
Гадецька С. В. (Svitlana Gadetska)	104	Мартовицький В. О. (Vitalii Martovytskyi)	118
Гайдар Н. К. (Nataliia Haidar)	114	Мірошніченко Н. М. (Nataliia Miroshnichenko) ...	97
Гапон Д. А. (Dmytro Gapon)	55	Нечаусов А. С. (Artem Nechausov)	37
Гасанов А. Г. (Arif Hasanov)	61	Порошенко А. І. (Anton Poroshenko)	65
Гашимов Е. Г. (Elshan Hashimov)	61	Проценко А. А. (Andrii Protsenko)	27
Гороховатський В. О. (Volodymyr Gorokhovatskyi)	5	Пустовойтов П. Є. (Pavlo Pustovoitov)	114
Демідова Ю. Є. (Yulia Demidova)	75	Раскін Л. Г. (Lev Raskin)	70
Дроздова Т. В. (Tatyana Drozdova)	75	Рубан І. В. (Igor Ruban)	118
Дубницький В. Ю. (Valeriy Dubnitskiy)	104	Самохвалов Ю. Я. (Yurii Samokhvalov)	81
Жадан О. В. (Oleksii Zhadan)	5	Свинчук О. В. (Olha Svynchuk)	32
Заволодько Г. Е. (Ganna Zavolodko)	104	Святкін Я. В. (Iaroslav Sviatkin)	70
Зуєв А. О. (Andrey Zuev)	55	Серков А. А. (Aleksandr Serkov)	124
Ібрагімов Б. Р. (Bayram Ibrahimov)	61	Смірнова Т. В. (Tetiana Smirnova)	129
Іванов В. Г. (Valeriy Ivanov)	27	Стяглик Н. І. (Natalia Stiahlyk)	5
Іванчихін Ю. В. (Yuriy Ivanchikhin)	70	Талібов А. М. (Aziz Talibov)	61
Іохов О. Ю. (Oleksandr Iohov)	81	Тверитникова О. Є. (Elena Tverytnykova)	75
Калінін Є. І. (Yevhen Kalinin)	37	Ходирев О. І. (Alexander Khodyrev)	104
Качанов П. О. (Petro Kachanov)	55	Холєв В. О. (Vladyslav Kholiev)	48
Коваленко А. А. (Andriy Kovalenko)	65	Челак В. В. (Viktor Chelak)	12
Коваленко А. С. (Anna Kovalenko)	129	Штаненко С. С. (Serhii Shtanenko)	81
Ковальчук Д. М. (Dmytro Kovalchuk)	43	Щербань А. В. (Andrii Shcherban)	129
Колумбет В. П. (Vadim Kolumbet)	32	Яковенко І. В. (Igor Yakovenko)	124

Наукове видання

Сучасні
інформаційні системиAdvanced
Information SystemsНауковий журнал
Том 6, № 1Відповідальний за випуск *О. Ю. Заковоротний*
Технічні редактори *Д. С. Гребенюк, А. П. Шиман*
Комп'ютерна верстка *Н. Г. Кучук*

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

Підписано до друку 11.02.2022 Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 16,75. Тираж 100 прим. Зам. 211-22

Адреса редакції: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"
Кафедра ОТИ, 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 № 24800000000106167 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 004.932.2:004.93'1

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.1.01>В. О. Гороховатський¹, Н. І. Стяглик², О. В. Жадан¹¹ Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна² ННІ Каразінський банківський інститут Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЇ МОДЕЛІ ДАНИХ ДЛЯ ОПИСІВ КЛАСІВ У ЗАДАЧІ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

Анотація. Предметом досліджень статті є методи класифікації зображень за множиною дескрипторів ключових точок у системах комп'ютерного зору. Метою є підвищення ефективності класифікації шляхом впровадження багатокомпонентної моделі даних на множині дескрипторів для бази еталонних образів. Застосовувані методи: детектор та дескриптори ORB, апарат теорії множин і векторного простору, метричні моделі визначення релевантності для множин багатовимірних векторів, елементи теорії ймовірностей, програмне моделювання. Отримані результати: розроблено модифікований метод класифікації зображень на основі впровадження багатокомпонентної моделі для аналізу даних із системою центрів, визначено способи побудови множини центрів даних, найбільш ефективним є медоїд множини і базовані на ньому центри. Результативність модифікації суттєво залежить від способу формування центрів, застосованої моделі класифікації, а також від самих даних. Найкращі результати показала класифікація з інтегрованим показником окремо для кожного із еталонів у вигляді суми значень розподілів для набору центрів; експериментально перевірена результативність класифікації, підтверджена працездатність запропонованого методу. Практична значущість роботи – побудова моделей класифікації у трансформованому просторі даних, підтвердження працездатності запропонованих модифікацій на прикладах зображень, створення програмного застосунку для впровадження розроблених методів класифікації у системах комп'ютерного зору.

Ключові слова: комп'ютерний зір; структурні методи класифікації зображень; дескриптор ORB; система центрів даних; багатокомпонентна модель, медоїд множини; результативність класифікації.

Вступ

У структурних методах класифікації зображень прийняття рішення про клас візуального об'єкту здійснюється на підґрунті апарату дескрипторів ключових точок (КТ) [1-4]. При цьому опис візуального об'єкту як множина багатовимірних векторів даних зіставляється із множинами векторів, що відображають інформацію про базу еталонів. У процесі класифікації необхідно здійснити оцінювання ступеня релевантності для об'ємних множин багатовимірних векторів даних об'єкту та еталонів.

У роботах [1-2, 5] запропоновано результативні ансамблеві підходи для обчислення релевантності із використанням значень розподілів для сформованих компонентів даних за параметрами статистичних центрів для еталонних описів, що створюють базу для класифікації. Визначені центри мають статистичний зміст, так як відображають властивості конкретної підмножини даних [1, 4]. Ефективність ансамблевих методів суттєво залежить від структури опису у багатовимірному просторі та обчислених значень еталонних центрів, а тому є вищою для згрупованих даних, що мають згущення у векторному просторі. Але загалом аналізовані дані можуть мати будь-яку структуру, не обов'язково згруповану у кластери [6-8]. Зауважимо, що результативність будь-якої класифікації у значній мірі залежить від складу описів еталонів як представників класів.

У статті [3] з метою покращення апроксимаційних властивостей для системи аналізу даних при

обчисленні релевантності запропоновано впровадження незалежної множини кластерних центрів для кожного із еталонів, що на підставі впровадження багатокомпонентної моделі сприяє підвищенню результативності класифікації за рахунок більш детального подання структури даних і узгодження з еталонною інформацією [6]. Загалом представлення множини дескрипторів зображення не єдиним, а кількома сегментами даних із використанням розподілів на підґрунті системи центрів для сегментів сприяє підвищенню показників розподільної здатності класифікатора.

Таким чином, створення класифікатора на підставі єдиного центру із-за практично необмеженого різноманіття видів даних не завжди може забезпечити необхідну результативність класифікації. У такому випадку можна застосувати модель класифікації з декількома центрами (багатокомпонентне подання), що реалізують поглиблене представлення даних для здійснення ефективного аналізу.

Мета роботи – підвищення результативності структурних методів класифікації зображень шляхом впровадження багатокомпонентної моделі даних на множині дескрипторів для бази еталонних образів. **Завдання дослідження** полягають у побудові та обчисленні параметрів для компонентних моделей структур даних на множині структурних ознак бази еталонів, впровадження цих моделей у процес класифікації, вивчення результативності розроблених модифікацій класифікаторів шляхом програмного моделювання.

Способи формування центрів аналізованих даних

Формально опис візуального об'єкту у структурних методах класифікації зображень представляється скінченною множиною числових векторів – дескрипторів ключових точок [4]. Центри даних шляхом побудови багатокомпонентної моделі для такого опису є інтегрованими характеристиками для окремих підструктур (токенів) у аналізованій множині даних. При цьому у якості фокусів для такої моделі даних можуть бути використані, наприклад, центри кластерів [3, 14], процентильні співвідношення у кортежі відсортованих даних за параметром медоїду множини [4-8], обчислені функції на підставі побітового статистичного аналізу множини дескрипторів [12-14], представники корзин даних з фіксованим значенням хеш-функції [4, 16, 17], вибрані елементи опису за значенням критерію інформативності [21], онлайн визначені центри, що відображають найбільш візуально важливі точки зображення, та ін.

Сформовані центри визначаються за даними і є результатом часткової адаптації класифікатора до даних. Наше дослідження показує [3], що від вибору центрів даних у значній мірі залежить прикладна результативність побудованого класифікатора. Ефективним засобом для формування параметрів центрів може бути оцінювання розподільних властивостей ознак еталонів на підставі критеріїв інформативності [6, 16, 21].

Іншим способом може бути формування опорних точок для множини векторів, де початкова точка вибирається довільно, а решта по черзі формується шляхом вибору найбільш віддаленої точки від уже обраних [20, 24].

Розподіли за системою центрів у багатокомпонентній моделі

Формально маємо деяку базу E описів зображень еталонів розміром N : $E = \{E_1, E_2, \dots, E_N\}$. Кожен еталонний опис E_i , $i = \overline{1, N}$, представляє у задачі класифікації окремий клас та має вид скінченної множини дескрипторів КТ зображення: $E_i = \{e_v(i)\}_{v=1}^s$, де s – фіксована кількість дескрипторів КТ у описі еталону E_i [1, 4]. Нехай M – фіксоване число створених центрів даних у кожному еталоні, а $b_{k,i}$ – центр з номером k еталону E_i , $k = \overline{1, M}$. Параметр M тут характеризує число компонентів у моделі даних. Тоді загальне число побудованих центрів у такій моделі даних дорівнює $M * N$, а кожний із центрів відноситься до фіксованого еталону [3].

У відповідності до технології [1, 2] на базі визначеної множини еталонних центрів $\{b_{k,i}\}_{k=1}^M \}_{i=1}^N$ у багатокомпонентній моделі даних впровадимо для довільного дескриптора $z \in Z$ аналізованого опису Z процедуру формування його статистичного розподілу за системою центрів

$$d[z] = \begin{bmatrix} d_{1,1}, d_{2,1}, \dots, d_{M,1}, \\ d_{1,2}, d_{2,2}, \dots, d_{M,2}, \\ \dots, \\ d_{1,N}, d_{2,N}, \dots, d_{M,N} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N d_{k,i} = 1. \quad (2)$$

Зауважимо, що значення $d_{k,i}$ в (1), отримані за технологією [1, 2], відображають відносну ступінь належності елемента $z \in Z$ до компоненти моделі з центром $b_{k,i}$ на підставі обчислення деякої міри подібності $\phi(z, b_{k,i})$ векторів z та $b_{k,i}$, а умова (2) відтворює цю міру у статистичну площину як відношення міри подібності до конкретної компоненти класу та суми значень подібностей до усіх компонентів класів загалом [2, 3, 10].

Із способу обчислення виразів (1), (2) із-за введеної схеми розмивання інформації стає зрозумілим, що число M центрів для кожного із еталонів не може бути занадто великим, і на практиці обмежене значеннями 2...5 [3]. У протилежному випадку при значній кількості компонент та еталонів на результат оброблення суттєво будуть впливати похибки обчислень, що призведе до невпевненості рішення.

Подано дані розподілу (1) у вигляді матриці $d[z] = \{\{d_{k,i}\}_{k=1}^M \}_{i=1}^N$, кожний стовпець якої містить інформацію про статистичну належність ознаки z до фіксованого класу E_i з номером i у складі компоненти із номером k . Структура матриці $d[z]$ містить непересічні блоки-стовпці із M компонентів, що характеризують ступінь належності до фіксованого еталону. Для класифікатора найбільш важливою є лише інформація про належність до еталону, а багатокомпонентна модель сприяє визначенню цього фактору.

За результатом побудови розподілів (1) для усіх елементів $\forall z \in Z$ опису Z маємо сукупність даних у вигляді s матриць виду (1), яку покладемо в основу побудови класифікатора.

Класифікація за розподілами компонентів даних

1. Найбільш зрозуміла і проста з прикладної точки зору схема побудови класифікатора полягає в здійсненні інтеграції θ_i розподілів в межах кожного із класів і подальшому виявленні класу r розпізнаваного об'єкта з найбільшим значенням критерію θ_i :

$$\theta_i = \sum_{z \in Z} \sum_{k=1}^M d_{k,i}(z). \quad (3)$$

Цей спосіб фактично відтворює схему класифікації з єдиним центром [1, 2], але з попередньою побудовою сукупності компонент та їх центрів.

Більш глибокий аналіз реалізується схемами опрацювання за множиною компонентів всередині класів як для окремих дескрипторів опису, так і за їх повною сукупністю. Варіантами оброблення є інтегрування розподілів в межах компонент окремих еталонів з прийняттям класифікаційного рішення за

максимумом серед критеріїв для інтегрованих компонент, сумою критеріїв для компонент окремих класів або шляхом логічного аналізу отриманих інтегрованих критеріїв.

Інші варіанти аналізу множини розподілів полягають у реалізації по-елементної класифікації окремо для кожного із дескрипторів об'єкта із подальшим узагальненням отриманих значень класів за моделлю бустінгу [6].

2. Інтегрування значень розподілів в межах набору компонент. За даними аналізованої сукупності матриць $d[z] = \{\{d_{k,i}\}_{k=1}^M\}_{i=1}^N$, $\forall z \in Z$ отримаємо гуртові значення критеріїв для об'єкту з описом Z :

$$\theta_{k,i} = \sum_{z \in Z} d_{k,i}(z). \quad (4)$$

Варіанти класифікаційних рішень можуть приймати вигляд

$$r = \arg \max_{i,k} \theta_{k,i},$$

$$r = \arg \max_i \sum_k \theta_{k,i}, \quad (5)$$

$$r = \arg \max_i L[\{\theta_{k,i}\}, k \in E_j],$$

де L – деяка функція на підмножині значень, а позначення $k \in E_j$ означає аналіз набору компонент із класу E_j . Одним із варіантів L є, наприклад, визначення класу за критерієм суми для значень двох найбільших компонент кожного з класів. Правила класифікації (5) можуть бути підсилені шляхом введення додаткового логічного аналізу отриманих екстремумів на предмет їх значущості, щоб знизити рівень помилок 1-го роду [3-6].

3. Формування значення класу окремо для кожного дескриптора з узагальненням числа голосів за описом об'єкту. Цей спосіб отримав назву «класифікація дескриптор об'єкту – еталон» і має перевагу в тому сенсі, що дає можливість відсіяти помилкові дескриптори, що виникають із-за впливу завад.

Варіанти класифікаційного рішення стосовно окремого дескриптора $\forall z \in Z$ матимуть вид

$$r_i = \arg \max_k d_{k,i},$$

$$r_i = \arg \max_j \sum_{k \in E_j} d_{k,i},$$

$$r_i = \arg \max_j L[\{d_{k,i}\}, k \in E_j]$$

За результатом (6) $\forall z \in Z$ виконується інкрементація $\Sigma_i = \Sigma_i + 1$ числа голосів Σ_i визначеного класу, а результуючий клас об'єкту визначається за максимумом отриманого числа голосів як

$$r = \arg \max_i \Sigma_i. \quad (7)$$

Зважаючи на тісний зв'язок статистичних та метричних підходів у класифікації зображень [2-4, 10-12, 19, 24], розглянуті способи можуть базуватися і виключно на обчисленні відстаней між значенням аналізованих даних (дескрипторів об'єкту) та

визначеними еталонними центрами, що в деякій мірі спрощує обчислення, так як дає можливість оброблення у просторі цілих чисел. Для цього моделі (3)-(7) можна модифікувати з використанням лише вимірювань метрики у просторі векторів.

Одним із критеріїв впевненості класифікації можна вибрати відносне значення перевищення максимуму $\theta_{\max 1}$ функціоналу над найближчим його максимумом $\theta_{\max 2}$ для іншого класу

$$\Delta = [\theta_{\max 1} - \theta_{\max 2}] / \theta_{\max 1}. \quad (8)$$

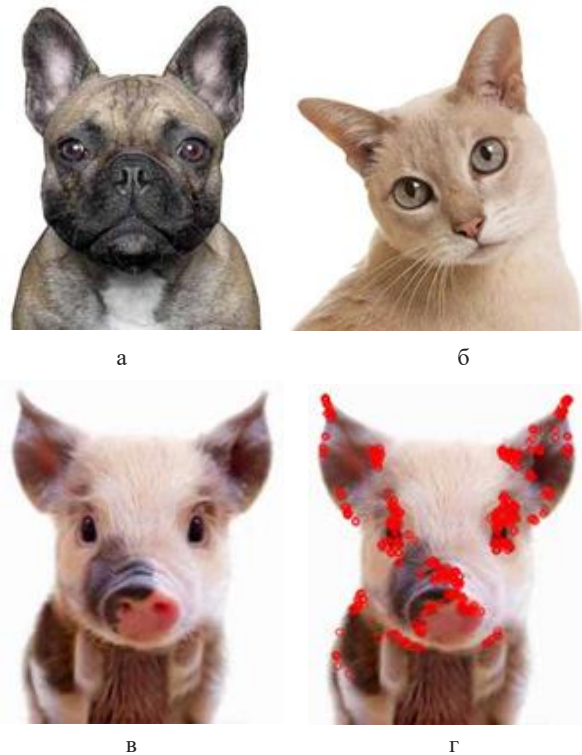


Рис. 1. Еталонні зображення: а, б, в – еталони; г – координати ORB-дескрипторів (**Fig. 1.** Standards images: а, б, в — standards, г – coordinates of ORB descriptors)

Метрикою для зіставлення дескрипторів взято відстань Хемінга, яка обчислює число розбіжностей між двома двійковими послідовностями. Максимально можливе значення відстані складає 256. Для кожного із описів обчислено вектор медоїду. Наведено приклад медоїду для 1-го еталону:

```
011101111001010000001001001010011011001101110
1000101101100100111101100110001101001011011101
100000110001000111111110010111100011001000111
011011010001111100101001101000110011001011011
000001111111100000001010101100101111100110000
11101111101111000101100001
```

Рис. 2. Вектор медоїду для 1-го еталону (**Fig. 2.** Medoid vector for the 1st standard)

Експериментальні відстані Хемінга між медоїдами еталонів склали: 1-2 – 108 (42% від максимальної відстані 256); 1-3 – 119 (46%); 2-3 – 41 (16%).

Як бачимо, за критерієм відстані між медоїдами описів еталони 2 та 3 досить схожі, а еталон 1 у достатній мірі відрізняється від інших.

Для порівняння обчислено також відстань Хаусдорфа [4, 21] між описами еталонів. Вона склала: 1-2 – 95 (37% від максимуму 256); 1-3 – 101 (40%); 2-3 – 93 (36%). Видно, що відстань Хаусдорфа (типу множина – множина) краще розділяє ці конкретні дані, ніж відстань між їх медоїдами.

Далі дескриптори кожного опису з метою формування набору центрів сортувалися за значенням їх сумарної відстані до решти дескрипторів опису. Як один із варіантів набору центрів вибрано дескриптори з номерами 1 (медоїд), 125, 250 із відсортованого списку.

За виразом (3) побудовано класифікатор, на вхід якого подавались еталонні зображення. Сумарні значення критерію (3) для варіанту з одним та трьома центрами показано у табл. 1, 2.

За результатом аналізу цих конкретних зображень бачимо ефективну класифікацію у обох варіантах (традиційному та запропонованому) з приблизно однаковим показником впевненості Δ . Максимум критерію відповідає «своєму» номеру класу, тобто знаходиться на діагоналі. У той же час значення показника Δ впевненості рішення для обох способів невелике.

Таблиця 1 – Значення критерію (3) з одним центром (медоїд)

	1	2	3	Δ , %
1	171.68	165.45	162.87	3,63
2	156.74	172.32	170.95	0,79
3	152.46	173.07	174.47	0,81

Таблиця 2 – Значення критерію (3) з трьома центрами (1, 125, 250)

	1	2	3	Δ , %
1	169.95	166.55	163.50	2,0
2	157.35	172.3	170.35	1,13
3	154.55	172	173.45	0,84

Зауважимо при цьому, що час класифікації за трьома центрами зріс приблизно на 12% у порівнянні з єдиним центром (1280 мсек та 1460 мсек).

Наш експеримент показав суттєвий вплив способу вибору центрів на результативність багатокomпонентної класифікації, що вказує на необхідність попереднього поглибленого вивчення структури аналізованих даних задля забезпечення ефективного визначення центрів компонентів.

Безпосередній вибір серед різноманіття варіантів трьох центрів із списку дескрипторів в більшості випадків показав неефективність класифікації з кількома центрами для наявних даних. Для формування дієвих центрів необхідно керуватись відповідними критеріями. Найбільшу ефективність при цьому продемонстрував вибір медоїду в якості одного із центрів.

Використання різноманітних варіантів класифікації з моделями виду (5) і різними варіантами вибору центрів для аналізованих зображень показали їх нижчу ефективність у порівнянні з моделлю (3), де здійснюється інтегральне оцінювання за сумою значень розподілів для кожного із еталонів.

За результатами проведених експериментів за ефективністю класифікації можна відзначити моделі (3) та (6), причому (6) найбільш працездатною виявилася у варіанті

$$r_i = \arg \max_j \sum_{k \in E_j} d_{k,j},$$

де голос дескриптора визначається за максимумом суми значень розподілів для набору центрів окремо кожного із еталонів. Значення числа голосів при розділенні пар класів (1 та 3, 2 та 3) з єдиним центром за цією моделлю наведено у табл. 3, 4.

Таблиця 3 – Результат класифікації для класів 1, 3

Число голосів дескрипторів			
	1	3	Δ , %
1	263	237	9.9
3	142	358	60.3

Таблиця 4 – Результат класифікації для класів 2, 3

Число голосів дескрипторів			
	2	3	Δ , %
2	266	234	12
3	228	272	16

3 центрами (1, 125, 250) модель (6) теж працездатна приблизно з такими ж показниками Δ . У той же час у сукупності усі три зображення кожна із моделей (3), (6) для обох варіантів вибору центрів не класифікує, так як невпевнено розрізняються дуже схожі між собою зображення 2, 3.

Зауважимо, що модель (6) з єдиним центром успішно застосовувалась нами для класифікації зображень метеликів [5], тобто може бути ефективною для інших зображень.

Із табл. 3, 4 бачимо, що навіть достатньо схожі еталони 2, 3 за різновидом моделі (6) класифікуються правильно і впевнено.

Зауважимо, що у ряді експериментів застосування класифікатора за моделлю (6) показало значно вищий показник впевненості $\Delta > 27$ у порівнянні з моделлю (3), де маємо лише $\Delta > 3$. Цей факт спостерігався для будь-якого застосованого числа центрів (1, 2, 3). Можна зробити висновок про більшу впевненість у прийнятті класифікаційного рішення для моделі (6) у порівнянні з моделлю (3).

Вибір центрів в значній мірі впливає на результат класифікації. Наприклад, зображення 1 та 3 також успішно та впевнено ($\Delta = 27$, $\Delta = 43$) класифікуються за моделями (3), (6) для такого набору із 3-х центрів: медоїд, найвіддаленіший дескриптор від медоїду, 250-й. Ці ж позитивні результати отримано і для набору із двох центрів: медоїд, найвіддаленіший дескриптор від медоїду. У той же час за цими ж моделями із використанням такої ж системи центрів близькі зображення 2 та 3 не розділяються.

Вибір центрів за критерієм інформативності [21], що відображає ступінь розрізнення множин дескрипторів із різних класів (еталонів), показав наступне. Значення інформативності безпосередньо для медоїдів наявних еталонів склало усього 19, 4, 12 і є невеликим у порівнянні з максимально мож-

ливим 256 як різниці між значеннями двох відстаней Хемінга. У деяких дескрипторів ця величина значно більша.

Для аналізованих експериментальних даних окремих еталонів максимальне значення інформативності дорівнює 50, 42, 51, що підтверджує їх суттєву близькість [21]. Застосування найбільш інформативного дескриптора у якості єдиного центру не дало переваги у порівнянні із центром - медоїдом. Вибір трьох найбільш інформативних дескрипторів для кожного із еталонів також не покращив результати класифікації у порівнянні з варіантом центрів (1, 125, 250).

Висновки

Розширення кількості центрів класів може бути дієвим механізмом для більш детального аналізу при класифікації даних. Введення моделі з кількома центрами даних у структурних методах класифікації зображень призводить до покращення класифікаційних властивостей у порівнянні з класифікацією за єдиним центром тільки у випадку впровадження ефективних процедур формування центрів. Результативність класифікації при цьому суттєво залежить від вибору центрів, застосованої моделі класифікації, а також від самих даних. Найкращі результати показали моделі з інтегрованим показником для

кожного із еталонів у вигляді суми значень розподілів для набору центрів. Вибір медоїду множини у якості центру дієво впливає на результат класифікації. Додаткові центри можна визначити на підставі критерію інформативності, що враховує відмінності між класами для значень дескрипторів еталонних описів. Інший спосіб полягає у формуванні опорних точок для множини дескрипторів у багатовимірному просторі даних.

Наукову новизну дослідження складає розроблення модифікованого методу класифікації зображень на основі впровадження структур даних із багатьох компонентів та їх центрів, що забезпечує поглиблений аналіз даних і необхідну ефективність класифікації.

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

Перспективи дослідження можуть бути пов'язані із опрацюванням спеціалізованих або універсальних процедур для формування центрів даних, адаптованих безпосередньо до самих даних, що покращить результативність класифікації.

REFERENCES

1. Daradkeh, Y.I., Gorokhovatskyi, V., Tvoroshenko, I., Gadetska, S., and Al-Dhaifallah, M. Methods of Classification of Images on the Basis of the Values of Statistical Distributions for the Composition of Structural Description Components, *IEEE Access*, 2021, 9, pp. 92964-92973, DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3093457>.
2. Gorokhovatsky V.O., Gadetska S.V., Stiahlyk N.I., Vlasenko N.V. Classification of images based on an ensemble of statistical distributions by classes of etalons for structural description components. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020, №4, p. 85–94. DOI <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-9>.
3. Gorokhovatskyi, V., Ponomarenko, R. Classification of images based on the formation of independent cluster system within the structural descriptions of etalon dataset. *Advanced Information Systems*, 2020, Vol. 4, No. 2, pp. 17-23, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.04>.
4. Gorokhovatskyi V.O., Gadetska S.V. Statistical processing and data mining in structural image classification methods (monograph), 2020, Kharkiv, FLP Panov A.N., 128 p., DOI: <https://doi.org/10.30837/978-617-7859-69-6>.
5. Gorokhovatskyi, V., Gadetska, S., Zhadan, O., Khvostenko, O. Study of the effectiveness of image classifiers by statistical distributions for components of structural description. *Advanced Information Systems*, 2021, Vol. 5, No. 1, pp. 5-11, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.01>.
6. Flach, P. Machine learning. The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012.
7. Kohonen, T. Self-Organizing Maps. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2001). doi: [book/10.5555/558021](https://doi.org/10.5555/558021).
8. Nasirahmadi, A., Ashtiani, S.H.M.: Bag-of-Feature model for sweet and bitter almond classification. *Biosystems engineering*. 156, 51–60 (2017). doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.01.008>.
9. Hietanen, A., et al.: A comparison of feature detectors and descriptors for object class matching. *Neurocomputing*. 184, 3–12 (2016). doi: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.08.106>.
10. Kim S. Biologically motivated perceptual feature: Generalized robust invariant feature / S. Kim, I.-S. Kweon. – In Asian Conf. of Comp. Vision (ACCV-06). – 2006. – P. 305–314.
11. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study, *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*, pp. 593-597, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>.
12. Gadetska, S.V., Gorokhovatsky, V.O. Statistical Measures for Computation of the Image Relevance of Visual Objects in the Structural Image Classification Methods. *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2018, Vol. 77 (12), pp. 1041–1053.
13. Nong Ye. Data Mining: Theories, Algorithms, and Examples (1st. ed.). CRC Press, Inc., USA – 2013.
14. Gorokhovatskyi, O., Gorokhovatskyi, V., and Peredrii, O., Analysis of Application of Cluster Descriptions in Space of Characteristic Image Features, *Data*, 2018, 3(4), 52. – doi: <https://doi.org/10.3390/data3040052>.
15. 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, pp. 89-101.
16. Oliinyk, A., Subbotin, S., Lovkin, V., Blagodariy, O., Zaiko, T. The System of Criteria for Feature Informativeness Estimation in Pattern Recognition. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, №4, pp. 85-96.
17. Leskovets, Yu., Radzharaman, A., Ulman, D. (2016) Analyzing large datasets, Moscow, DMC Press, 2016. 498 p.

18. Xu Zhang, Felix X. Yu, Svebor Karaman, Shih-Fu Chang. Learning Discriminative and Transformation Covariant Local Feature Detectors. The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017, pp. 6818-6826.
19. Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G. Pattern classification, 2ed., Wiley, 2000.–738 p.
20. 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. – Vol. 3587 – 2005. – P. 445–455.
21. Gorokhovatskyi, V. & Vlasenko, N. (2021), “The image description reduction in the set of descriptors on informativeness metric criteria base”, *Advanced Information Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 10-16, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.02>.
22. Q. Bai, S. Li, J. Yang, Q. Song, Z. Li & X. Zhang (2020), “Object Detection Recognition and Robot Grasping Based on Machine Learning: A Survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 855–879, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028740>.
23. Celik, C. and Sakir, H. Content based image retrieval with sparse representations and local feature descriptors: A comparative study, *Pattern Recognit.*, vol. 68, pp. 1–13, Aug. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.03.006>.
24. Peters, J.F. Foundations of Computer Vision. ISRL, vol. 124. Springer, Cham (2017). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52483-2>.
25. OpenCV Open Source Computer Vision, Accessed: Jun. 28, 2021. Available: <https://docs.opencv.org/master/index.html>.
26. Emgu CV: OpenCV in .NET (C#, VB, C++ and more), Accessed: Jan. 12, 2022. Available: https://www.emgu.com/wiki/index.php/Main_Page.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Daradkeh, Y.I., Gorokhovatskyi, V., Tvoroshenko, I., Gadetska, S. Al-Dhaifallah, M. Methods of Classification of Images on the Basis of the Values of Statistical Distributions for the Composition of Structural Description Components, *IEEE Access*, 2021, 9, pp. 92964-92973, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3093457>.
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: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-9>.
3. Гороховатський, В.О., Пономаренко, Р.П. Класифікація зображень на підставі формування незалежної системи кластерів у складі структурних описів бази еталонів. *Сучасні інформаційні системи*, 2020, т. 4, №2, с. 17–23, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.04>.
4. 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: <https://doi.org/10.30837/978-617-7859-69-6>.
5. Гороховатський, В.О., Гадецька, С.В., Жадан, О.В., Хвостенко, О.В. Дослідження результативності класифікаторів зображень за статистичними розподілами для компонентів структурного опису. *Сучасні інформаційні системи*, 2021, т. 5, №1, с. 5–11, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.01>.
6. Flach, P. Machine learning. The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012.
7. Kohonen, T. Self-Organizing Maps. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2001). doi: [book/10.5555/558021](https://doi.org/10.5555/558021).
8. Nasirahmadi, A., Ashtiani, S.H.M.: Bag-of-Feature model for sweet and bitter almond classification. *Biosystems engineering*. 156, 51–60 (2017). doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.01.008>.
9. Hietanen, A., et al.: A comparison of feature detectors and descriptors for object class matching. *Neurocomputing*. 184, 3–12 (2016). doi: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.08.106>.
10. Kim S. Biologically motivated perceptual feature: Generalized robust invariant feature / S. Kim, I.-S. Kweon. – In Asian Conf. of Comp. Vision (ACCV-06). – 2006. – P. 305–314.
11. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study, *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*, pp. 593-597, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>.
12. Gadetska, S.V., Gorokhovatsky, V.O. Statistical Measures for Computation of the Image Relevance of Visual Objects in the Structural Image Classification Methods. *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2018, Vol. 77 (12), pp. 1041–1053.
13. Nong Ye. Data Mining: Theories, Algorithms, and Examples (1st. ed.). CRC Press, Inc., USA – 2013.
14. Gorokhovatskyi, O., Gorokhovatskyi, V., and Peredrii, O., Analysis of Application of Cluster Descriptions in Space of Characteristic Image Features, *Data*, 2018, 3(4), 52. – doi: <https://doi.org/10.3390/data3040052>.
15. 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, pp. 89-101.
16. Oliinyk, A., Subbotin, S., Lovkin, V., Blagodariy, O., Zaiko, T. The System of Criteria for Feature Informativeness Estimation in Pattern Recognition. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, №4, pp. 85-96.
17. Leskovets, Yu., Radzharaman, A., Ulman, Dzh Jeffery D. (2016) Analyzing large datasets, Moscow, DMC Press, 2016. 498 p.
18. Xu Zhang, Felix X. Yu, Svebor Karaman, Shih-Fu Chang. Learning Discriminative and Transformation Covariant Local Feature Detectors. The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017, pp. 6818-6826.
19. Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G. Pattern classification, 2ed., Wiley, 2000.–738p.
20. 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. – Vol. 3587 – 2005. – P. 445–455.
21. Гороховатський, В.О., Власенко Н.В. Редукція опису зображення у складі множини дескрипторів на основі метричного критерію інформативності. *Сучасні інформаційні системи*, 2021, т. 5, №4, с. 10–16, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.02>.
22. Q. Bai, S. Li, J. Yang, Q. Song, Z. Li, and X. Zhang, “Object Detection Recognition and Robot Grasping Based on Machine Learning: A Survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 181855–181879, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028740>.

23. Celik, C. and Sakir, H. Content based image retrieval with sparse representations and local feature descriptors: A comparative study, Pattern Recognit., vol. 68, pp. 1–13, Aug. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.03.006>.
24. Peters, J.F. (2017), Foundations of Computer Vision. ISRL, vol. 124. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52483-2>.
25. OpenCV Open Source Computer Vision, Accessed: Jun. 28, 2021. Available: <https://docs.opencv.org/master/index.html>.
26. Emgu CV: OpenCV in .NET (C#, VB, C++ and more), Accessed: Jan. 12, 2022. Available: https://www.emgu.com/wiki/index.php/Main_Page.

Received (Надійшла) 12.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.01.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

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

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

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

Стяглик Наталя Іванівна – кандидат педагогічних наук, завідувач кафедри інформаційних технологій і математичного моделювання, Навчально-науковий інститут «Каразінський банківський інститут» Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна;

Natalia Stiahlyk – Candidate of Pedagogical Sciences, Head of Department of Information Technology and Mathematical Modeling, Educational and Research Institute “Karazin Banking Institute” of V. N. Karazin KNU, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: natastyaglick@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5938-2013>.

Жадан Олексій Віталійович – студент кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Oleksii Zhadan – student of Informatics Department, Kharkiv National University of RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: oleksii.zhadan@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3415-8450>.

Применение многокомпонентной модели данных для описания классов в задаче классификации изображений

В. А. Гороховатский, Н. И. Стяглик, А. В. Жадан

Аннотация. Предметом исследований статьи являются методы классификации изображений по множеству дескрипторов ключевых точек в системах компьютерного зрения. Целью является повышение эффективности классификации путем внедрения многокомпонентной модели данных на множестве дескрипторов для базы эталонных образов. Применяемые методы: детектор и дескрипторы ORB, аппарат теории множеств и векторного пространства, метрические модели определения релевантности для множеств многомерных векторов, элементы теории вероятностей, программное моделирование. Полученные результаты: разработан модифицированный метод классификации изображений на основе внедрения многокомпонентной модели для анализа данных с системой центров, определены способы построения множества центров данных, наиболее эффективен медоид множества и базированные на нем центры. Результативность модификации существенно зависит от способа формирования центров, используемой модели классификации, а также от самих данных. Наилучшие результаты показала классификация с интегрированным показателем для каждого из эталонов в виде суммы значений распределений для набора центров; экспериментально проверена результативность классификации, подтверждена работоспособность предлагаемого метода. Практическая значимость работы - построение моделей классификации в трансформированном пространстве данных, подтверждение работоспособности предлагаемых модификаций на примерах изображений, создание программного приложения для внедрения разработанных методов классификации в системах компьютерного зрения.

Ключевые слова: компьютерное зрение; структурные методы классификации изображений; дескриптор ORB; система центров данных; многокомпонентная модель, медоид множественного числа; результативность классификации.

Application of multi-component data model for class descriptions in the image classification problem

Volodymyr Gorokhovatskyi, Natalia Stiahlyk, Oleksii Zhadan

Abstract. The subject of research of the article is the methods of image classification according to the set of descriptors of key points in computer vision systems. The aim is to increase the efficiency of classification by introducing a multicomponent data model on a set of descriptors for the base of reference images. Applied methods: ORB detector and descriptors, apparatus of set theory and vector space, metric models for determining the relevance of sets of multidimensional vectors, elements of probability theory, software modeling. Results are obtained: a modified method of image classification based on the introduction of a multicomponent model for data analysis with a system of centers is developed, methods of constructing a set of data centers are identified, the most effective is the set medoid and centers based on it. The effectiveness of the modification significantly depends on the method of forming the centers, the applied classification model, as well as on the data itself. The best results were shown by the classification with the integrated indicator separately for each of the standards in the form of the sum of the values of the distributions for the set of centers; experimentally tested the effectiveness of the classification, confirmed the efficiency of the proposed method. The practical significance of the work is the construction of classification models in the transformed data space, confirmation of the efficiency of the proposed modifications on the examples of images, the creation of software for the implementation of developed classification methods in computer vision systems.

Keywords: computer vision; structural methods of image classification; ORB descriptor; data center system; multicomponent model, medoid set; effectiveness of classification.

Viktor Chelak, Svitlana Gavrylenko

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute, Kharkiv, Ukraine

METHOD OF COMPUTER SYSTEM STATE IDENTIFICATION BASED ON BOOSTING ENSEMBLE WITH SPECIAL PREPROCESSING PROCEDURE

Abstract. The subject of the research is methods of identifying the state of the Computer System. The object of research is the process of identifying the state of a computer system for information protection. The aim of the research is to develop the method for identifying the state of a computer system for information protection. This article is devoted to the development of method (boosting ensemble) to increase the accuracy of detecting anomalies in computer systems. **Methods used:** artificial intelligence methods, machine learning, decision tree methods, ensemble methods. **The results were obtained:** a method of computer system identification based on boosting ensemble with special preprocessing procedure is developed. The effectiveness of using machine learning technology to identify the state of a computer system has been studied. Experimental researches have confirmed the effectiveness of the proposed method, which makes it possible to recommend it for practical use in order to improve the accuracy of identifying the state of the computer system. **Conclusions.** According to the results of the research, ensemble classifier of computer system state identification based on boosting was proposed. It was found that the use of the proposed classifier makes it possible to reduce the variance to 10%. In addition, due to the optimization of the initial data, the efficiency of identifying the state of the computer was increased. Prospects for further research may be to develop an ensemble of fuzzy decision trees based on the proposed method, optimizing their software implementation.

Keywords: computer system state identification; data processing; decision tree boosting ensembles.

Introduction

In the modern world, the task of information security is one of the highest priority goals. It's all to blame for the losses that any technology area can incur. These losses can affect even the most distant areas from information technology. This task is becoming more difficult every year and is demanding on the accuracy and speed of performance of methods for detecting threats and their prevention. [1]

One of the subtasks of our scientific direction is the identification of the state of a computer system. A computer system can be defined by a large number of features: the workload of various components, the amount of processed memory per second, etc. If we add to this a huge number of processes that are performed in processor races, we get a gigantic set of data, factors and conflicting information that needs to be processed. In order to find our potential features, it is necessary to analyze our data and make optimization according to criteria, perform preliminary data processing. This approach will improve our training set to achieve low errors on machine learning methods.

The aim of the research is to develop method for identifying the state of a computer system using an algorithm for pre-processing the original data.

Analysis of related works. In [2], a comparative analysis was carried out on various applied problems using ensemble methods: Gradient Boosting, Extreme Gradient Boosting, etc. The results of this considered work were good enough for boosting algorithms. The work [3] presents a method aimed at solving applied problems in the field of medicine and diagnostics. However, while this model works perfectly in tasks related to signals and images, for non-uniform data (such as in the task of intrusion detection) it showed a high variance error. There are also interesting solutions to the problems of classifying web pages using boosting algorithms [4]. Unfortunately, the presented models work

poorly on data with weak correlations, while only a small amount of characteristics of a computer system have strong correlations. Therefore, this is a rather high disadvantage for tasks that are considered by the field of information protection. The article [5] proposes a boosting method, specifies the optimization problem for a special procedure for updating the weights of the classifiers in boosting. The method is highly accurate, but consumes a lot of resources for recognition. Given that the problem of identifying the state of the system requires frequent analysis and monitoring in almost real time, the method does not fit the class of problems under consideration due to performance. A very specific one was proposed in [6] based on regression boosting algorithms. This method does an excellent job with tasks that work online (in real time). But it also has limitations (in order to protect against overfitting), which makes it impossible to obtain high accuracy on the test sample.

As a result of the analysis of relative work, one can draw attention to the fact that each method focuses on a specific task and criteria to the detriment of other criteria. The class of boosting algorithms is able to solve the problem of classifying the state of a computer system in order to detect threats, but it needs modification.

Formulation of the problem. Build a model which is capable of making multiple classification of the state of a computer system. Basic requirements for such a model:

- The bias error must be 0%.
- The variance error must not exceed 10%.
- For cases of binary classification, the system output "-1" means the normal state of the computer system and "1" - an abnormal state. For multiple classifications, anything other than zero means a specific class of threat, anomaly, intrusion, malware family, etc.
- The speed of classifying the state of the constructed model should not exceed 1 second. Otherwise, the constructed model will not be able to process data in real time.

- The training time is not strictly limited. However, it should consider the possibility of adding new data during the week. (behavioral models of zero-day vulnerabilities).

- Ability to update weights and new factors.
- The developed system should not affect more than 10% of the operating system resources. (RAM usage, CPU time, etc.).

- A special data preprocessing procedure is required to remove anomalies and noise in the training set.

The input data that are described in the training and test samples are presented in Table 1.

The input data were examined using statistical characteristics such as variance, mathematical expectation, standard deviation. A comparison was also made between the characteristics for the test sample and the training sample to balance the data. One of the main characteristics for machine learning, the correlation coefficients is presented in Table 2.

As a result, the input data in a large number of cases turned out to have a very low correlation (0.0, 0.1). The training set also contains highly correlated data obtained as a result of the simplest operations on some criteria. For example, the calculation of the total CPU workload is the usual sum of four other criteria.

Table 1 – Lists of input data that are used to describe a computer system

The code	Name of Input data	Description
A	C0 Percent Disk Read Time	System volume (Read only)
B	C0 Percent Disk Write Time	System volume (Write only)
C	C0 Percent Idle Time	System volume Idle time
D	C0 Percent Disk Time	System volume total time (100% - C or A + B)
E	D1 Percent Disk Read Time	Other volumes (Average, Read)
F	D1 Percent Disk Write Time	Other volumes (Average, Write)
G	D1 Percent Idle Time	Other volumes (Average, Idle)
H	D1 Percent Disk Time	Other volumes ("E + F")
I	Total Percent Disk Read Time	All volumes (Cumulative, Read)
J	Total Percent Disk Write Time	All volumes (Cumulative, Write)
K	Total Percent Idle Time	All volumes (Cumulative, Idle)
L	Total Percent Disk Time	All volumes (Cumulative, R+W)
M	CPU0 Percent Processor Time	First CPU core workload
N	CPU1 Percent Processor Time	Second CPU core workload
O	CPU2 Percent Processor Time	Third CPU core workload
P	CPU3 Percent Processor Time	Fourth CPU core workload
Q	CPU Total Percent Processor Time	Overall CPU workload
R	Ethernet Bytes Sent	Total number of bytes sent
S	Ethernet Bytes Received	Total number of bytes received
T	Free RAM Memory	Unused RAM
U	Calculated Percentage Usage	Difference between RAM size and T

Table 2 – Correlation coefficients of input data

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
A	-	0.00	-0.66	0.98	0.00	0.00	0.01	0.00	0.44	0.00	-0.55	-0.43	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
B	0.00	-	-0.69	0.20	0.00	0.02	-0.03	0.00	0.00	0.92	-0.58	0.09	-0.04	-0.03	-0.04	-0.04
C	-0.66	-0.69	-	-0.79	-0.01	-0.05	0.11	-0.01	-0.30	-0.65	0.88	-0.36	0.08	0.08	0.08	0.08
D	0.98	0.20	-0.79	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	0.19	-0.65	0.44	-0.04	-0.04	-0.05	-0.05
E	0.00	0.00	-0.01	0.00	-	0.10	-0.27	1.00	0.90	0.04	-0.14	0.90	0.00	-0.01	0.00	-0.01
F	0.00	0.02	-0.05	0.00	0.10	-	-0.68	0.14	0.08	0.42	-0.37	0.13	0.04	0.03	0.04	0.03
G	0.01	-0.03	0.11	0.00	-0.27	-0.68	-	-0.30	-0.24	-0.30	0.57	-0.27	-0.03	-0.02	-0.03	-0.04
H	0.00	0.00	-0.01	0.00	1.00	0.14	-0.30	-	0.90	0.05	-0.16	0.90	0.00	-0.01	0.00	-0.01
I	0.44	0.00	-0.30	0.43	0.90	0.08	-0.24	0.90	-	0.03	-0.37	0.99	-0.02	-0.03	-0.02	-0.02
J	0.00	0.92	-0.65	0.19	0.04	0.42	-0.30	0.05	0.03	-	-0.68	0.13	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
K	-0.55	-0.58	0.88	-0.65	-0.14	-0.37	0.57	-0.16	-0.37	-0.68	-	-0.43	0.05	0.05	0.05	0.05
L	-0.43	0.09	-0.36	0.44	0.90	0.13	-0.27	0.90	0.99	0.13	-0.43	-	-0.02	-0.03	-0.02	-0.03
M	-0.04	-0.04	0.08	-0.04	0.00	0.04	-0.03	0.00	-0.02	-0.02	0.05	-0.02	-	0.97	0.97	0.97
N	-0.04	-0.03	0.08	-0.04	-0.01	0.03	-0.02	-0.01	-0.03	-0.02	0.05	-0.03	0.97	-	0.97	0.97
O	-0.04	-0.04	0.08	-0.05	0.00	0.04	-0.03	0.00	-0.02	-0.02	0.05	-0.02	0.97	0.97	-	0.97
P	-0.04	-0.04	0.08	-0.05	-0.01	0.03	-0.04	-0.01	-0.02	-0.02	0.05	-0.03	0.97	0.97	0.97	-

1. Preprocessing, decision trees and boosting ensemble for identifying the state of the computer system

A special data preprocessing procedure can be represented in the form of 4 parts:

1. Processing conflicting information.
2. Handling missing values.
3. Handling anomalous values (strong outliers).
4. Noise handling (weak outliers).

Conflicting information means two or more samples that are completely coinciding in all criteria and

at the same time have different output classes. No such samples were found in the training set used in this study. However, it is necessary to take into account the fact that the data is obtained in real time and the likelihood of collisions is quite possible.

The way to deal with such data is quite simple - to estimate the probabilities. If conflicting information tends in most cases (80% or more) to one of the classes, delete the data that does not include this sample in this class. If the data does not have such a single class or, in the worst case, is distributed across classes, such data must be deleted.

In the process of monitoring the indicators of a computer system, a failure may occur, due to which some criteria in the sample are lost. An example would be hard disk load values. At the time of the request for information, the system did not have access to it, which is why an empty string or NaN was returned. In the case of training, such data is initially not allowed in the training set. In any case, the system must correctly process the input data in the classification mode. It is necessary to store and calculate the average value of each criterion, and in case of its absence, supply the average value to the model instead of an empty datum. This approach will help to avoid a strong distortion of statistical characteristics (the mathematical expectation will remain the same).

Strong and weak outliers can be found and removed from the training set using machine learning methods such as One-class support vector machines, DBSCAN, etc. The proposed system uses several methods at once to detect anomalies. In addition to those already listed, a standard deviation (coefficient is 3.0) is used to detect strong outliers or anomalies. The standard deviation is calculated for each criterion and only if many criteria are outside the specified range - the sample is considered abnormal and removed. As a result of such cleaning, about 15-25% of the data will be eliminated.

In addition to preprocessing the samples, the proposed solution analyzes the criteria themselves for optimization. The criteria are not considered in case a large number of high absolute values of the correlation coefficients (0.8 or higher). Criteria for which the variance value is close to zero will also be excluded, as such criteria are insignificant. The data is also being scaled to the normalized range (0, 1). If such normalization results in a low variance, the data are scaled in the range from 0 to 10n, where n starts at 1 and is increased until the variance has an acceptable value or the criteria is detected as insignificant and deleted.

Any ensemble has an ordinary element. To solve the problem of identifying the state of a computer system, decision trees are used as an ordinary element. Decision tree is a special case of binary trees and has nodes of two types: leaf or result node and internal or decision-making node. The leaf node is a kind of an exit point from the tree, the result of the model's work, its response. The decision-making node tests one of the sample criteria for equality or exceeding a threshold. When the test succeeds, such a node directs the sample to the next layer (right branch), which can be either the next decisive element or the resulting one. Otherwise the sample is

directed to the left branch, which can also be a node of any type. An example of a tree that stands for an ensemble is shown in Fig. 1. It should also be noted that, in contrast to standard decision trees, the proposed method has a weighted accuracy estimate (1). This allows such a tree to be used as a boosting element.

$$E = \sum_{i=1}^N w_i [y_i \neq t_i], \quad (1)$$

where w_i – weight of i -th training sample; y_i – actual classification result for i -th training sample; t_i – required classification result for i -th training sample; N – number of samples; $[y_i \neq t_i]$ – indicator function (2).

$$[y_i \neq t_i] = \begin{cases} 1, & y_i \neq t_i; \\ 0, & y_i = t_i. \end{cases} \quad (2)$$

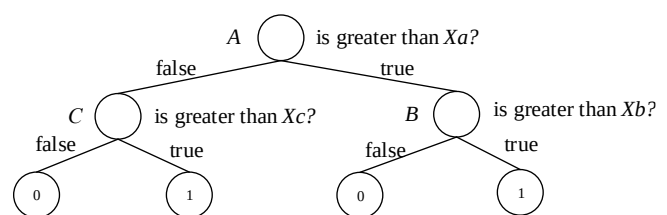


Fig. 1. Example of decision tree

The algorithm for constructing a decision tree can be described by the following actions:

1. Pick a criterion.
2. Find the minimum and maximum values in the training sample. (left and right border)
3. Find the average value between the maximum and minimum values and assign it to the threshold point of the criterion.
4. If the error on both branches is not high, go to step 6.
5. Determine in which branch the error is greater. Find the average between the threshold and the border of the side of the branch and assign it to the threshold. Assign the old value of the threshold to the opposite border. Go to step 4.
6. Repeat steps 1-5 for all criteria.
7. Choose the best criterion (with the minimum value of the error function).
8. Recursively repeat steps 1-7 for the branch with larger error (unless the error on both branches is zero). Do the same for the other branch, unless its error is zero.
9. If the current element is the root element and the error function is zero, the decision tree is built.

The procedure for building a decision tree is rather complicated, because it provides for work with heterogeneous data. In addition, such trees can be controlled using a fitness function and parameters such as maximum tree depth, programmable stop condition, etc.

The structure of the proposed boosting algorithm is shown in Fig. 2. The main idea behind boosting is the principle of building such an ensemble. The construction of classifiers occurs sequentially. Initially, equal weighting factors are assigned to all samples. Then, for

samples that the tree has not learned to recognize correctly or has spent too many decisive elements, the weighting factors increase, while for other samples, they decrease.

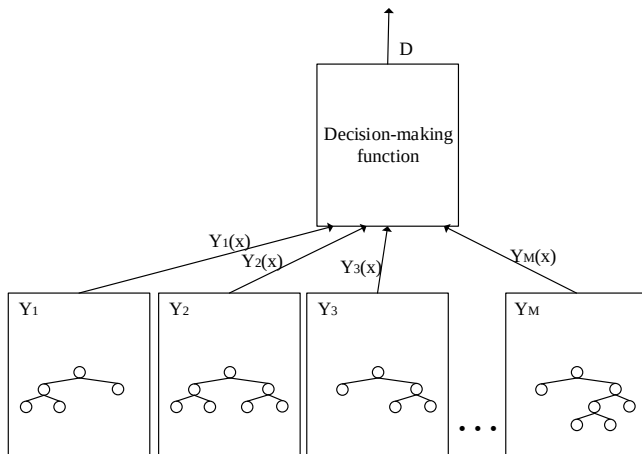


Fig. 2. The structure of the constructed model of the boosting ensemble

Each tree in boosting has its own weight coefficient, which depends on the error rate (3):

$$e_r = E / \sum_{i=1}^N w_i, \quad (3)$$

where e_r – error rate of r -th classifier; E – weighted accuracy estimate.

Expression for classifier weight (4) is used for the final decision-making based on the decisions of all elements of the ensemble.

$$\varsigma_r = \ln((1 - e_r) / e_r), \quad (4)$$

where ς_r – weight of r -th classifier.

To build the next tree, the weights of the training sample are adjusted (5):

$$w_i^{r+1} = w_i^r e^{\varsigma_r [y_i \neq t_i]}, \quad (5)$$

where w_i^{r+1} – weight of i -th training sample for next decision tree; w_i^r – weight of i -th training sample for current decision tree.

Ensemble decision making for the case of binary (6) and multiple (7) classification is presented below.

$$D = \text{sign}(\sum_{r=1}^M \varsigma_r y_r(x)), \quad (6)$$

where D – decision of boosting ensemble (complex result of ensemble); M – number of learners in boosting; $y_r(x)$ – result of r -th decision tree (classifier); x – vector of input values.

$$D_k = \sum_{r=1}^M \varsigma_r [y_r(x) = k]; D = k, D_k = \max_k (D_k), \quad (7)$$

where D_k – weighted decision for k -th class; $[y_r(x) = k]$ – indicator function that checks the equality

of the solution of the r -th classifier and a specific class k ; k – class number.

As can be seen from expression (6), in the case of a binary classification for the normal and anomalous state of a computer system, one can make a label for classes – 1 and 1, respectively, and using the sign function to obtain the final answer. If this is a multiple classification (7) – for each class, the sum of the weight coefficients of the classifiers, which recognize the input data as this class, is considered. The resulting decision in this case is determined by the plurality principle (the class with the highest sum of weights is the result) [7].

2. Analysis of results and comparison with standard models

A software prototype of the proposed model was developed. Fig. 3 shows a part of the tree, which is an element of the boosting ensemble. In order to check the effectiveness of the approach, it is necessary to compare not only the proposed method with the classical ones. But also make a comparison with data preprocessing (optimization of criteria and removal of inconsistent data, filling in the gaps in information, etc.) and without. The main characteristics of the methods are bias error value, variance error value, prediction speed and time spent on training.

As part of the comparison, we use not simple standard models of machine learning, but optimal ones (with the best parameters to maximize results). Such methods are: Optimized Decision Tree, Linear Discriminant, Quadratic Discriminant, Logistic Regression, Optimized SVM, Optimized Gaussian SVM, Optimized K-Nearest Neighbors, Weighted KNN, Random Forest, Ensemble of Sub-space KNN and Optimized AdaBoost.

Fig. 4 shows a comparative histogram for bias error. As you can see from the histogram, the special preprocessing procedure made a positive effect on the bias error not only for the proposed method, but also for most of the others, due to the removal of anomalies in the data. The quadratic discriminant method diverges on both normal and optimized data. And also the methods of linear discriminant and optimal AdaBoost were able to converge on sets with preprocessing. The proposed method (the rightmost bars in Fig. 4) received the minimum error on the training sample without preprocessing (only 1 sample was not recognized correctly) and after preprocessing it showed an error of 0%, which meets the requirements (the sample was removed, and of all the data it was the most anomalous sample).

Fig. 5 shows a comparison of the methods for variance error. The variance error is the absolute value of the difference between the bias error and the error on the test dataset (which were not used in training). The worst result was shown by an ensemble of KNN subspaces (over 50%). The rest of the methods have clearly improved the situation with preprocessing. Only optimized KNN, weighted KNN, logistic regression and random forest got errors less than 10%. However, some of them had a non-zero bias error - which is also critical for the system of identifying the state of a computer system. The proposed method showed low errors after preprocessing (0.17%).

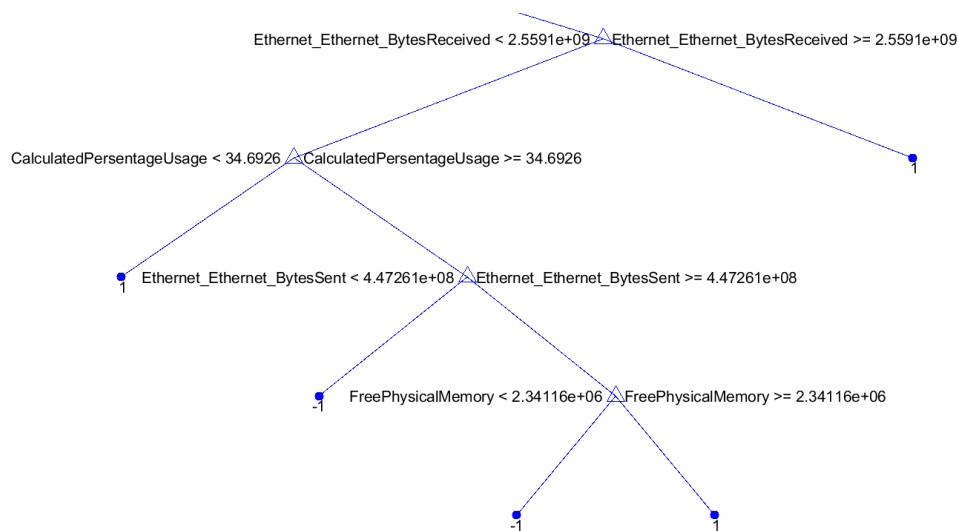


Fig. 3. Part of the built decision tree for the boosting ensemble (binary classification)

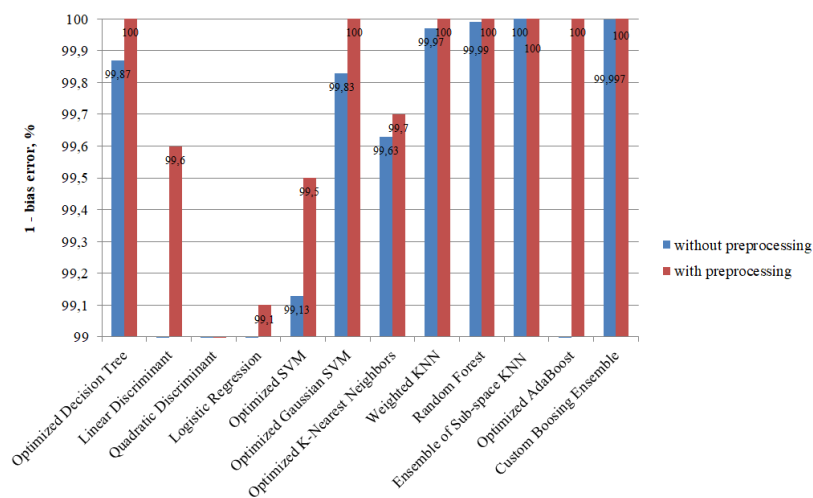


Fig. 4. Accuracy comparison on training data (100% - bias error)

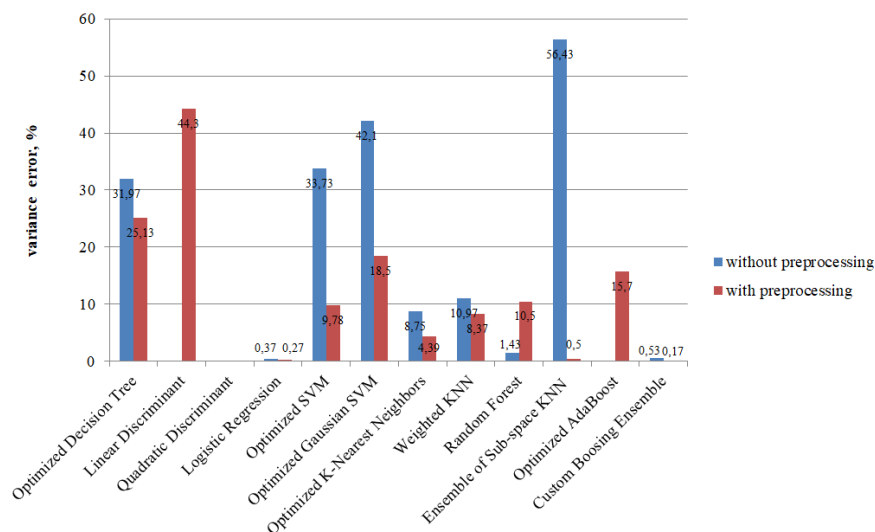


Fig. 5. Variance error comparison

Comparing the performance (Figure 6), it can be seen that this method is inferior to the standard methods in prediction rate. However, the requirement for performance (prediction rate is more than 1 sample per second) and resource costs are met. This prediction speed is sufficient to carry out identification of the state of a

computer system in real time. You should pay attention to two main points. First, the data presented in Fig. 6 are estimates, and are not accurate. Secondly, the proposed method has a limitation on the use of processor time, when other methods could use the processor at maximum load.

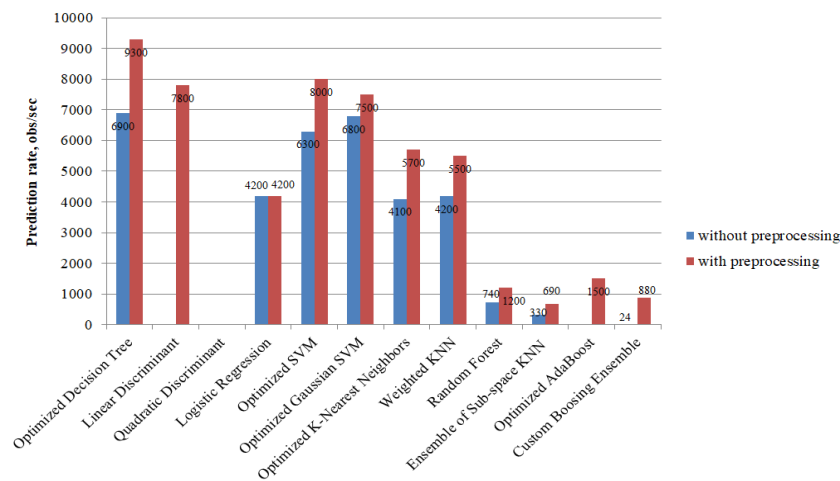


Fig. 6. Estimated prediction rate comparison

The last comparison was made for an insignificant characteristic - the training time (Figure 7). It should be noted that in this work there is no comparative analysis of the time for additional training. (in these situations, the training time is much shorter).

Unlike the prediction speed, the training time is an exact value. By using the preprocessing procedure, which reduced the amount of data and the load on the model building method, it was possible to accelerate training by ~ 25 times.

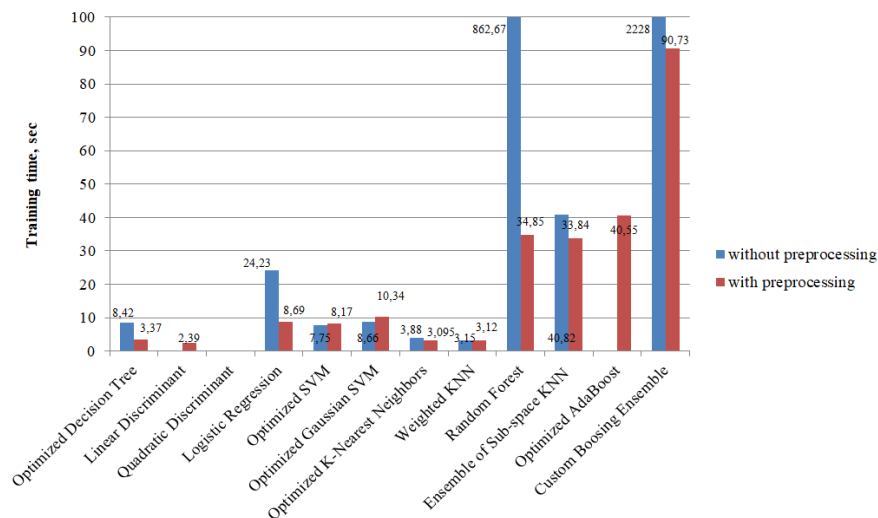


Fig. 7. Training time comparison

Conclusion

According to the results of the research, ensemble classifier of computer system state identification based on boosting was proposed. It was found that the use of the proposed classifier makes it possible to reduce the variance to 10%. In addition, due to the optimization of the initial data, the efficiency of identifying the state of the computer was increased. The practical significance lies in the fact that the developed method is implemented

in software and researched during the solution of the real problem of identifying the state of a computer system. The experiments confirmed the efficiency of the proposed method, which makes it possible to recommend it for practical use as an express method of analysis of the state of the computer system. Prospects for further research may be to develop an ensemble of fuzzy decision trees based on the proposed method, optimize its software implementation and improve the quality of classification.

REFERENCES

- (2020), "Inter American Development Bank and Organization of American States", *Cybersecurity Risks, Progress, and the Way Forward in Latin America and the Caribbean*, pp. 19-38, doi: <http://dx.doi.org/10.18235/0002513>.
- Kumkar, P., Madan, I., Kale, A., Khanvilkar, O. and Khan, A. (2018), "Comparison of Ensemble Methods for Real Estate Appraisal", *3rd International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, Coimbatore, India, pp. 297-300, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ICICT43934.2018.9034449>.
- Lee, S., Son, C., Albertini, M. K. and Fernandes, H. C. (2020), "Multi-Phases and Various Feature Extraction and Selection Methodology for Ensemble Gradient Boosting in Estimating Respiratory Rate", *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 125648-125658, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007524>.

4. Dutta, J., Kim, Y. W. and Dominic, D. (2020), "Comparison of Gradient Boosting and Extreme Boosting Ensemble Methods for Webpage Classification", *Fifth International Conference on Research in Computational Intelligence and Communication Networks (ICRCICN)*, Bangalore, India, pp. 77-82. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ICRCICN50933.2020.9296176>.
5. Li, Z. and Wang, D. (2020), "Classification on Point-cloud of Shoe-last Curvature using Weight-updated Boosting based Ensemble Learning", *IEEE 9th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*, Chongqing, China, , pp. 2073-2077, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ITAIC49862.2020.9338947>.
6. Mirza, H. (2018), "Online boosting algorithm for regression with additive and multiplicative updates", *26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Izmir, pp. 1-4, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/SIU.2018.8404455>.
7. Chelak, V. and Gavrylenko, S. (2021), "Development of Computer State Identification Method Based on Boosting Ensemble", *Fifth International Scientific and Technical Conference "Computer and Information Systems And Technologies"*, Kharkiv, pp.53-54, doi: <http://dx.doi.org/10.30837/csitic52021232208>.

Received (Надійшла) 22.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.01.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Челак Віктор Володимирович – аспірант кафедри «Обчислювальна техніка та програмування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Victor Chelak – PhD Student of Department of "Computer Engineering and Programming", National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: victor.chelak@gmail.com, Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0001-8810-3394>.

Гавриленко Світлана Юрївна – доктор технічних наук, професорка, професорка кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Svitlana Gavrylenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of "Computer Engineering and Programming", National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: gavrylenko08@gmail.com, Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-6919-0055>.

**Метод ідентифікації стану комп'ютерної системи на основі boosting ансамбля
з спеціальною процедурою передобробки даних**

В. В. Челак, С. Ю. Гавриленко

Анотація. Предметом дослідження є методи визначення стану комп'ютерної системи. Об'єктом дослідження є процес ідентифікації стану комп'ютерної системи для захисту інформації. Метою дослідження є розробка методу ідентифікації стану комп'ютерної системи для захисту інформації. Ця стаття присвячена розробці методу (boosting ансамбль) для підвищення точності виявлення аномалій в комп'ютерних системах. Методи, що використовуються: методи штучного інтелекту, машинне навчання, методи дерев рішень, ансамблеві методи. Отримано результати: розроблено метод ідентифікації комп'ютерних систем на основі бустингового ансамблю зі спеціальною процедурою передобробки. Отримано оцінку ефективності використання методів машинного навчання визначення стану комп'ютерної системи. Експериментальні дослідження підтвердили ефективність запропонованого методу, що дає змогу рекомендувати його для практичного використання з метою підвищення точності ідентифікації стану комп'ютерної системи. Висновки. За результатами дослідження запропоновано ансамблевий класифікатор ідентифікації стану комп'ютерної системи на основі бустингу. Встановлено, що використання запропонованого класифікатора дозволяє знизити помилку variance до 10%. Крім того, за рахунок оптимізації вихідних даних підвищено швидкість ідентифікації стану комп'ютерної системи. Перспективами подальших досліджень може бути розробка ансамблю нечітких дерев рішень на основі запропонованого методу, оптимізація їхньої програмної реалізації.

Ключові слова: ідентифікація стану комп'ютерної системи, опрацювання даних, boosting ансамблі дерев рішень.

**Метод идентификации состояния компьютерной системы на основе boosting ансамбля
с специальной процедурой предобработки данных**

В. В. Челак, С. Ю. Гавриленко

Аннотация. Предметом исследования являются методы определения состояния компьютерной системы. Объектом исследования является процесс идентификации состояния компьютерной системы для защиты информации. Целью исследования является разработка метода идентификации состояния компьютерной системы для защиты информации. Данная статья посвящена разработке метода (boosting ансамбль) для повышения точности обнаружения аномалий в компьютерных системах. Используемые методы: методы искусственного интеллекта, машинное обучение, методы деревьев решений, ансамблевые методы. Получены результаты: разработан метод идентификации компьютерных систем на основе бустингового ансамбля со специальной процедурой предобработки данных. Получена оценка эффективности использования методов машинного обучения для определения состояния компьютерной системы. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность предложенного метода, что позволяет рекомендовать его для практического использования с целью повышения точности определения состояния компьютерной системы. Выводы. По результатам исследования предложен ансамблевый классификатор идентификации состояния компьютерной системы на основе бустинга. Установлено, что использование предложенного классификатора позволяет снизить ошибку variance до 10 %. Кроме того, за счет оптимизации исходных данных повышена скорость определения состояния компьютерной системы. Перспективами дальнейших исследований может быть разработка ансамбля нечетких деревьев решений на основе предложенного метода, оптимизация их программной реализации.

Ключевые слова: идентификация состояния компьютерной системы, обработка данных, boosting ансамбли деревьев решений.

Information systems modeling

УДК 004.89

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.1.03>

О. В. Барабаш, О. І. Бандурка

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

МОДЕЛЮВАННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ НА ОСНОВІ ПРОГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ БАЙЄСА ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Анотація. Сьогодні різноманітну інформацію про лісові екосистеми можна отримати за допомогою методів дистанційного зондування Землі. Використання космічних даних моніторингу лісів є економічно вигідним, тому що дозволяє швидко отримувати об'єктивну інформацію, необхідну лісівникам для вирішення практичних задач. Супутникові дані забезпечують широке охоплення лісових угідь, високу точність результатів, а також високу частоту отриманих даних. Для дослідження було обрано космічні знімки території Овруцького району Житомирської області України влітку 2020 року. Визначення породного складу проведено методами керованої класифікації, а саме класифікатором Байєса. Встановлено, що 70 % лісів є сосновими, у меншій кількості зустрічаються осикові, грабові, березові, вільхові та ясеневі породи дерев. За статистичними даними впродовж 2000-2020 рр. в Україні було пошкоджено і знищено лісовими пожежами 51,4 тис. га лісових насаджень. Тому об'єктивна і своєчасна інформація про наслідки пожеж необхідна для вирішення широкого класу прикладних завдань лісового господарства. Важливим завданням при оцінці еколого-економічного збитку, нанесеного лісовому господарству внаслідок лісових пожеж, є визначення площі пошкоджених лісів. У роботі розглядається технологія визначення території лісу, де пройшла пожежа, з використанням космічних знімків супутника Landsat 8. Для виявлення спалених пожежею територій та рівнів враження використовується нормалізованого індексу згарища NBR до та після пожежі й індекс DNBR. Для прогнозування лісових пожеж створена математична модель на основі теореми Байєса та створена тематична карта з класами пожежної небезпеки поквартально. Для перевірки точності результатів створеної прогнозовної моделі проведено суміщення тематичної карти з шаром визначених територій згарищ. Даний програмний продукт є досить гнучким та універсальним, він може бути легко адаптованим для застосування не тільки для визначення спалених лісових угідь, а й для інших територій.

Ключові слова: моделювання лісових пожеж; інформаційна система; космічні знімки; дистанційне зондування Землі; Quantum GIS; індекс згарищ; формула Байєса; ймовірність виникнення пожежі.

Вступ

Ліси є головним наземним компонентом підтримки природної рівноваги в біосфері, джерелом відновлювальних біотичних ресурсів в період глобальних змін клімату. Об'єктивні дані про лісові ресурси, динаміка створення насаджень та лісокористування, їх біорізноманітність та географія є досить складним комплексним завданням для створення наукового та технічного забезпечення обліку та впорядкування лісів. На виконання цього завдання впливає також негативний антропогенний фактор, який іноді призводить до незворотних наслідків. У 80-х роках минулого століття та в 2000-х роках в Україні були зафіксовані масштабні лісові пожежі.

Проте в 2020 році великі пожежі пройшлися лісами Київської та Житомирської областей та призвели до знищення великої площі лісових угідь. Сучасний рівень аналітичних методів та комп'ютерних програм дозволяє суттєво підвищити моніторинг лісових угідь та спрогнозувати пожежну небезпеку в лісах.

Прогнозування лісових пожеж – це визначення ймовірності їх виникнення та розповсюдження в часі й просторі, ґрунтуючись на аналізі даних моніторингу лісів. Для прогнозування необхідні такі дані:

- клас пожежної небезпеки за погодними умовами;
- місцеположення та площі ділянок лісового фонду I-III класів пожежної небезпеки;

- орографічні дані (тип рельєфу: рівнини, пагорбки, гори, плоскогір'я, байраки);
- наявність потенційних джерел виникнення вогню на досліджуваній лісовій ділянці;
- дані ретроспективного аналізу розповсюдження пожеж в часі (кількість пожеж по роках, місяцях, тижнях) та за територією (лісництво, квартал, виділ).

Тому об'єктивна і своєчасна інформація про наслідки пожеж, отримана на основі інтеграції прогнозовної моделі та технологій геоінформаційних систем (ГІС), є вкрай необхідною для вирішення різноманітних завдань в лісовідновленні, актуалізації даних про лісові насадження, охороні природного лісового фонду.

Сьогодні різноманітну інформацію про лісові екосистеми можна отримати за допомогою методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Використання космічних даних моніторингу лісів є економічно вигідним, тому що дозволяє швидко отримувати об'єктивну інформацію, необхідну лісівникам для вирішення практичних задач. Супутникові дані забезпечують широке охоплення лісових угідь, високу точність результатів, а також високу частоту отриманих даних [1-9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних наукових та інформаційних джерел в області досліджень пожежонебезпечних територій та створення прогнозних моделей виникнення лісових пожеж виявив цілу низку фундаментальних та перспективних робіт.

У дослідженнях Васильєва А.В., Краснящих А.В., Коротаєва В.В. розглянута розробка програмно-апаратного комплексу виявлення та моніторингу лісових пожеж на базі безпілотного літального апарату. У роботі [10] застосовується метод суміщення зображень тепловізійного та телевізійного каналів, детально описана архітектура спеціального програмного забезпечення. Худов В., Кучук Г., Маковейчук М., Крижний А. зосереджують свій аналіз на відомих методах сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження [8].

За принципом побудови є аналітичні, імітаційні та статистичні математичні моделі. Аналітичні моделі лісових пожеж описані в роботах Гришина А.М., Куценка Л.М., Васильєва С.В. [12, 13], у яких створена математична і фізична модель, наведена основна модель рівнянь, розглянута структура фронту пожежі і граничні умови його розповсюдження. Проте чисельні розв'язання систем рівнянь не володіють достатньою простотою, в умовах невизначеностей методи вимагають велику кількість фізичних характеристик та складних математичних розрахунків, тому вони непридатні для проведення оперативно-тактичних заходів.

Для розробки довгострокового прогнозу змін пожежонебезпеки для змішаних типів лісів у світі вже використовують розроблений комплекс програм FORRUS-S, який призначений для імітаційного моделювання та аналізу динамічних процесів, що відбуваються у лісах. Вихідною інформацією для побудови моделі є виділи таксацій та планів лісових насаджень. Програмно-технічне рішення є прототипом програмного модуля, що дозволяє функціонально інтегрувати чотири математичних модуля різних компонентів системи та процесів кругообігу елементів в одну систему [17, 18].

Актуальність даної роботи полягає у відсутності універсальної системи, в якій би прослідковувалася інтеграція математичної моделі, ГІС технологій та прогновної моделі експерта, яка була б гнучко пристосована до всіх типів лісових насаджень та значним чином розширила б можливості прийняття правильних управлінських рішень.

Метою дослідження є розробка інформаційної системи, яка буде аналізувати наслідки лісових пожеж із використанням технологій ДЗЗ та робити прогнози

щодо виявлення пожежонебезпечних територій на основі прогностичної моделі Байєса.

Основна частина

Для максимізації ефективності управління, зменшення витрат та об'єктивного визначення таксаційних показників в лісовому господарстві доцільним є впровадження методів дистанційного зондування Землі. Вони знаходять широке застосування для моніторингу лісів завдяки доступності супутникових знімків на значних територіях, а отримані дані володіють значною інформативністю й при правильній обробці можуть дати безліч корисної інформації про лісові угіддя: визначення площі, деревного складу, зміни у лісових насадженнях, місця поширення лісових пожеж, вирубок. При аналізі спектральних каналів супутникових знімків є можливість отримати інформацію про «здоров'я» лісу, його ураженість шкідниками чи вік. Загалом можна дізнатися інформацію про майже всі таксаційні показники лісових угідь за допомогою всього лише набору знімків та спеціалізованої програми. Дані дистанційного вимірювання можуть бути використані як альтернатива більш вартісним наземним спостереженням та вимірюванням. Для визначення стану лісових угідь можна використовувати як космічні знімки, так і результати авіаційного знімання. Для детального аналізу лісових угідь найкраще користуватися космічними знімками дуже високої роздільної (субметрової) здатності (GeoEau, QuickBird, WordView). Проте, з точки зору економічності та достатності для оцінки стану пожежонебезпечності, оптимальним є використання знімків високої (метрової) роздільної здатності.

Для проведення дослідження була обрана територія Овруцького району Житомирської області. Використовуються дані космічних знімків літнього періоду 2020 року, що були зроблені супутником Landsat 8. Знімки знаходяться у вільному доступі і їх можна отримати за допомогою таких сайтів як EOS LandViewer чи USGS Earth Explorer. Знімки мають формат зображення GeoTIFF з географічною системою координат WGS 84 та опорною системою WRS-2. Вони містять одинадцять спектральних каналів, що являють собою різні набори даних, які використовуються для різних цілей (табл. 1).

Таблиця 1 – Спектральні канали знімка Landsat 8

№ п/п	Назва	Довжина хвилі (нм)	Роздільна здатність (м/пікс.)	Що краще показує
1	Coastal Aerosol	0.433 – 0.453	30	Мілководдя, тонкі частинки пилу
2	Синій	0.450 – 0.515	30	Глибоководдя, атмосфера
3	Зелений	0.525 – 0.600	30	Рослинність
4	Червоний	0.630 – 0.680	30	Антропогенні об'єкти, ґрунт, рослинність
5	Ближній інфрачервоний	0.845 – 0.885	30	Берегові лінії, рослинність
6	KXB* інфрачервоний 1	1.560 – 1.660	30	Хмарність, вологість ґрунтів і рослинності
7	KXB* інфрачервоний 2	2.100 – 2.300	30	Хмарність, вологість ґрунтів і рослинності
8	Панхроматичний	0.500 – 0.680	15	Чорно-білі знімки, чіткі деталі
9	Перисті хмари	1.360 – 1.390	30	Перисті хмари
10	Тепловий інфрачервоний 1	10.30 – 11.30	100	Термальне картографування, оціночна вологість ґрунтів
11	Тепловий інфрачервоний 2	11.50 – 12.50	100	Покращене термальне картографування, оціночна вологість ґрунтів

* KXB – короткохвильовий

Актуалізація стану лісових угідь виконана методами керованої класифікації, яка полягає у:

- визначенні класів лісових угідь;
- виконанні класифікації космічного знімка, який являє собою комбінацію спектральних каналів 3, 4, 5, 6, 7, 8;
- побудові векторного картографічного шару лісових масивів на основі растрового шару результатуючої класифікації.

Визначення класів полягає в формуванні статистичних вибірок пікселів знімку для кожної породи. Вибір виконується шляхом позначення контрольних полігонів на знімку, там де ми точно знаємо породу дерев. Такий вибір ми робимо за допомогою карти лісових виділів. На базі цих статистичних вибірок формуються сигнатури класів. Керована класифікація використовує класифікатор Байєса: на основі сигнатур визначених класів формуються система рівнянь, які визначають ймовірність приналежності пікселя космічного знімка відповідному класу, і для кожного пікселя космічного знімку оцінюється ймовірність його приналежності певному класу (рис. 1).

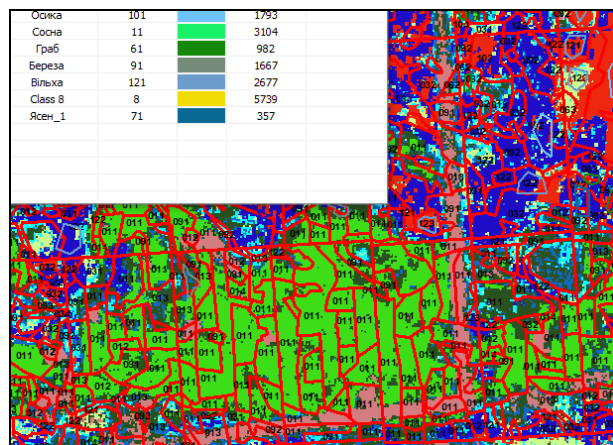


Рис. 1. Класифікація породного складу по лісових виділах Овруцького району

Fig. 1. Classification of species composition by forest species of Ovruch district

Встановлено, що 70 % лісів є сосновими. Також в лісах зустрічаються осикові, грабові, березові, вільхові та ясеневі породи дерев. Відомо, що соснові ліси є найбільш потенційно небезпечними об'єктами з огляду на лісові пожежі. Протягом останніх років збільшилась кількість виникнення лісових пожеж хвойних порід, здебільшого на Поліссі, а саме в Житомирській області. За результатами аналізу даних лабораторією екології УкрНДІЛГА впродовж 2000-2019 рр. в Україні було пошкоджено і знищено лісовими пожежами 51,4 тис. га лісових насаджень. У 2020 році втрата від лісових пожеж у Житомирській та Луганській областях України переходить межі десятки тисяч гектарів. Тому об'єктивна і своєчасна інформація про наслідки пожеж необхідна для вирішення широкого класу прикладних завдань лісового господарства, включаючи планування охорони і захисту лісів, лісочористування та лісовідновлення, актуалізацію даних про лісові ресурси.

1. Технологія визначення спалених пожежами територій. Для визначення територій, які були

вражені пожежами, використовуються дані космічних знімків, що були зроблені супутником Landsat 8, до та після пожежі відповідно. Знімки містять одну й ту ж географічну область місця пожеж Овруцького району. Для визначення спалених пожежею територій використовується порівняння значень нормалізованого індексу згарища NBR до та після пожежі, який розраховується за формулою:

$$NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR), \quad (1)$$

де NIR – ближній інфрачервоний канал (5 канал з табл. 1), SWIR – короткохвильовий інфрачервоний 2 канал (7 канал з табл. 1).

Даний індекс показує враження лісових територій пожежею. Результат розрахунку нормалізованого індексу згарищ зі шкалою від -1.00 до 1.00, де -1.00 – абсолютно не вражені території, а 1.00 – повністю вигорілі. Це показано на рис. 2, де розташовуються знімки до та після пожежі.

Для порівняння зміни індексу NBR між періодом до пожежі та після неї використовується показник DNBR, який знаходиться за формулою:

$$DNBR = (prefire\ NBR) - (postfire\ NBR), \quad (2)$$

де *prefire NBR* – показник індексу NBR до пожежі, *postfire NBR* – показник індексу NBR після пожежі.

Для визначення рівнів враження території отримані дані показника DNBR, які класифікуються: рівень зростаючої території (на графіку показано темно-зеленим кольором), неспаленої – світло-зеленим, низько-враженої – бежевим, середньо-враженої – помаранчевим та сильно-враженої території – темно-червоним (рис. 3). Вікно також містить спеціальне поле для виводу спаленої території в метрах квадратних, яка розраховується за отриманим показником.

Система експортує отримані дані про область пожеж в форматі GeoTIFF, що зберігає географічні координати об'єкту та забезпечує сумісність використання отриманої інформації з різними географічними системами.

2. Прогнозування настання лісової пожежі методом Байєса. Для прогнозування лісових пожеж та своєчасного їхнього попередження лісничим та інженерам з охорони лісу потрібно знати ймовірність їх виникнення протягом пожежонебезпечного періоду, яка буде залежати від таксаційних характеристик лісових насаджень та кліматичних умов, на території кожного лісництва. Для цього ми використовуємо теорему Байєса – це одна з основних теорем теорії ймовірностей, яка обчислює ймовірність події за умови, що інша подія, яка пов'язана з нею, вже відбулася. Формула Байєса допомагає більш точно поррахувати ймовірність події, враховуючи як і відомі дані, так і нові. Для практичного застосування формули потрібно проводити багато обчислень, тому байєсовські оцінки стали активно використовуватися з швидким розвитком інформаційних технологій.

Нехай подія K може відбутися лише одночасно з однією з гіпотези $H_1, H_2, \dots, H_n$, які утворюють повну групу несумісних подій, тобто $\sum_{i=1}^n P(H_i) = 1$.

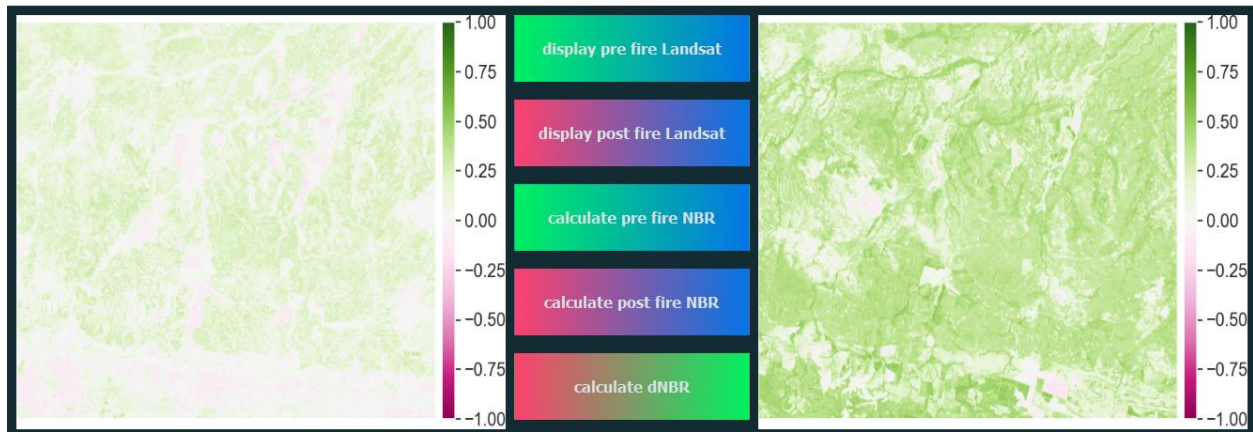


Рис. 2. Відображення індексів NBR до і після пожежі (Fig. 2. Display of NBR indices before and after the fire)

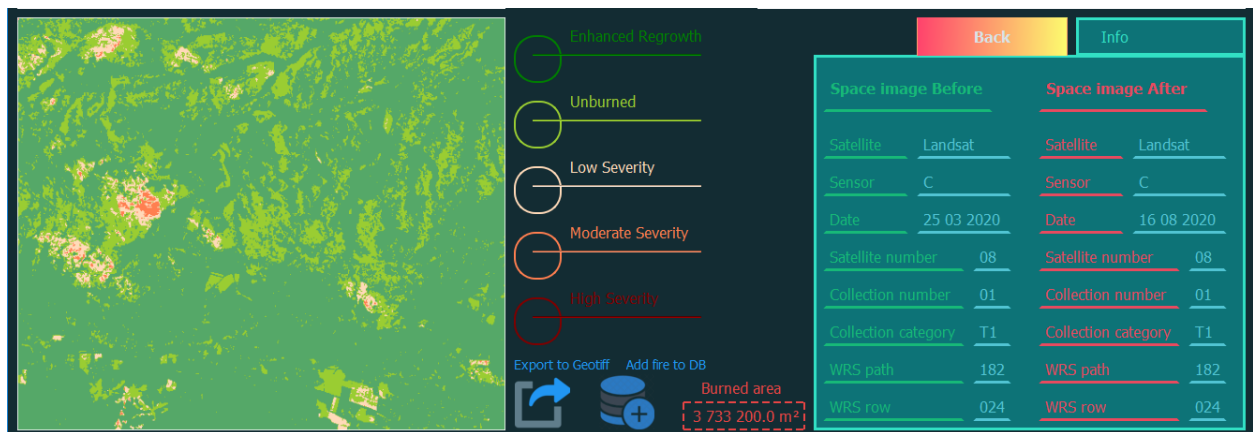


Рис. 3. Відображення показника індексу DNBR (Fig. 3. Display the DNBR index)

Тоді за теоремою Байєса ймовірність події K , яка може настати лише з появою однієї з подій H_i , дорівнює сумі добутків ймовірностей кожної з гіпотез на відповідну умовну ймовірність події K :

$$P(K) = \sum_{i=1}^n P(H_i) \cdot P(K/H_i). \quad (3)$$

Для події K характерний комплекс ознак $k_1, k_2, \dots, k_v$, які в свою чергу ще можуть поділятися на розряди $k_{j1}, k_{j2}, \dots, k_{jm}$, за якими буде проводитися дослідження.

Тоді для визначення ймовірності гіпотези за умови, що подія K уже відбулася, використовується узагальнена формула Байєса:

$$P(H_i/K) = \frac{P(H_i) \cdot P(K/H_i)}{\sum_{i=1}^n P(H_i) P(K/H_i)}, \quad (4)$$

де $P(H_i)$ – апіорна ймовірність гіпотези H_i , K – подія, для якої характерний певний комплекс ознак $k_1, k_2, \dots, k_v$, n – загальна кількість можливих гіпотез, $P(H_i/K)$ – апостеріорна ймовірність гіпотези H_i після того, як стали відомі результати по комплексу ознак події K , $P(K/H_i)$ – ймовірність настання події K з гіпотезою H_i , яка обчислюється за формулою:

$$P(K/H_i) = P(k_1/H_i) \cdot P(k_2/H_i) \cdot \dots \cdot P(k_v/H_i). \quad (3)$$

Для прогнозування лісових пожеж, своєчасного їхнього попередження та швидкої ліквідації потрібно знати ймовірність їхнього виникнення протягом пожежонебезпечного періоду, яка залежить від таксаційних характеристик лісових насаджень.

Для аналізу було обране Можарівське лісництво в Овруцькому районі. Площа лісових угідь лісництва становить 8298 га. Маючи статистичні дані по всіх таксаційних характеристиках кварталу, зробимо оцінку пожежонебезпечності кожного кварталу окремо по всьому лісництву і визначимо класи пожежної небезпеки.

Нехай K – подія, яка характеризує виникнення пожежі в лісі. Площа лісових угідь Можарівського лісництва поділена на 85 кварталів, отже маємо гіпотези $H_1, H_2, \dots, H_{85}$. Для того, щоб визначити ймовірність кожної гіпотези, потрібно площу кварталу поділити на загальну площу всіх досліджуваних кварталів лісництва, тобто

$$P(H_i) = \frac{S_{H_i}}{S}. \quad (4)$$

Для прикладу візьмемо територію 64 кварталу. Ймовірність для цього кварталу дорівнює

$$P(H_{64}) = \frac{S_{H_{64}}}{S} = \frac{28,4}{286,5} = 0,10.$$

На виникнення пожежі впливають такі фактори: ознака k_1 – склад лісових насаджень, ознака k_2 – повнота насаджень, ознака k_3 – вік лісових насаджень, ознака k_4 – тип лісорослинних умов (ТЛУ). Для того, щоб визначити ймовірність появи k_i ознаки в кварталі H_i , потрібно поділити площу лісу в кварталі, який має ознаку k_i , на площу всього кварталу, тобто

$$P(k_{ij}/H_i) = S_{k_{ij}}/S_{H_i}. \quad (5)$$

Ознака k_1 – склад насадження – це частка деревних порід, які є в лісовому насадженні. Основними лісовими насадженнями в Мажарівському лісництві є: k_{11} – сосна звичайна (Сз), k_{12} – береза повисла (Бп), k_{13} – дуб звичайний (Дз), k_{14} – вільха чорна (Влч), k_{15} – осика (Ос). Найбільш пожежонебезпечними є соснові насадження, тому для цієї ознаки із породного складу потрібно визначати площу території, де росте сосна звичайна. Для 64 кварталу маємо: $P(k_{11}/H_{64}) = 26,86/28,4 = 0,95$.

Ознака k_2 – повнота деревостану – це показник щільності стояння стовбурів на одиниці площі. Найбільш пожежонебезпечними є насадження з повнотою 0,7, 0,8, 0,9. Отже, можна виділити такі групи за повнотою насаджень: k_{21} – повнота 0,7 – 1; k_{22} – повнота 0 – 0,6. Визначимо ймовірність ознаки k_{21} для 64 кварталу: $P(k_{21}/H_{64}) = 24,1/28,4 = 0,85$.

Ознака k_3 – вік дерев – соснові молодняки віком до 40 років (група 2 і 3 класу) відносять до І класу природної пожежної небезпеки. У таких насадженнях пожежі майже завжди переходять у верхові, завдаючи значних ушкоджень, а ліквідація таких пожеж є складною. Отже, можна виділити такі групи віку: k_{31} – групи віку 2 і 3 (молодняки 1 і 2 класу до 40 років), k_{32} – групи 4-8 (інші, більше 40 років). Отже, визначаємо ймовірність для кожного класу пожежної небезпеки в 64 кварталі:

- І клас пожежної небезпеки – насадження групи віку 2 і 3:

$$P(k_{31}/H_{64}) = S_{k_{31}}/S_{H_{64}} = 6,1/28,4 = 0,21,$$

- II-IV класи пожежної небезпеки – групи віку 4-8:

$$P(k_{32}/H_{64}) = S_{k_{32}}/S_{H_{64}} = 22,3/28,4 = 0,79.$$

Ознака k_4 – тип лісу – це ділянка лісу або їх сукупність, які характеризуються єдиним ТЛУ, однаковим складом деревних порід, кількістю ярусів,

аналогічною фауною і потребують однакових лісогосподарських заходів при рівних економічних умовах. Основними є бір, суббір, сугруд, груд. Найбільш пожежонебезпечними є насадження в борах та суборах з індексами 0, 1 – І клас пожежної небезпеки, та індексом 2 – (II клас пожежної небезпеки (табл. 2).

Таблиця 2 – Класи пожежної небезпеки (ПоН) в лісі за типом ТЛУ для насаджень більше 40 років

Ознака	Клас ПоН	ТЛУ	Пояснення
k_{41}	I	A0C	Дуже сухий сосновий бір
		A1C	Сухий сосновий бір
		B1ДС	Сухий дубово-сосновий суббір
k_{42}	II	C1ГДС	Сухий грабово-дубово-сосновий сугруд
		A2C	Свіжий сосновий бір
		B2ДС	Свіжий дубово-сосновий суббір
k_{43}	III	C2ГДС	Свіжий грабово-дубово-сосновий сугруд
		A3C	Вологий сосновий бір
		A4C	Сирий сосновий бір
k_{44}	IV	B3ДС	Вологий дубово-сосновий суббір
		B4ДС	Сирий дубово-сосновий суббір
		C3ГДС	Вологий грабово-дубово-сосновий сугруд
		C4ГДС	Сирий грабово-дубово-сосновий сугруд
		A5C	Мокрий сосновий бір
		B5BC	Мокрий березово-сосновий суббір
		C5ВЛЧ	Вологий чорновільховий сугруд

Отже, рахуємо ймовірність по кожному класу пожежної небезпеки в 64 кварталі за ознакою k_4 :

- І клас пожежної небезпеки – насадження менше 40 років всіх індексів та насадження більше 40 років з індексами 0,1:

$$P(k_{41}/H_{64}) = P(k_{31}/H_{64}) = \frac{S_{k_{31}}}{S_{H_{64}}} = \frac{6,1}{28,4} = 0,21;$$

- II клас пожежної небезпеки – насадження більше 40 років з індексом 2:

$$P(k_{42}/H_{64}) = \frac{S_{k_{42}}}{S_{H_{64}}} = \frac{21,9}{28,4} = 0,78;$$

- III клас пожежної небезпеки – насадження більше 40 років з індексами 3,4:

$$P(k_{43}/H_{64}) = \frac{S_{k_{42}}}{S_{H_{64}}} = \frac{0,4}{28,4} = 0,01.$$

Порахуємо ймовірність настання пожежі в 64 кварталі з урахуванням класів пожежної небезпеки K_1, K_2, K_3 відповідно:

$$P(H_{64})P(K_1/H_{64}) = P(H_{64})P(k_{11}/H_{64})P(k_{21}/H_{64})P(k_{31}/H_{64})P(k_{41}/H_{64}) = 0,10 \cdot 0,95 \cdot 0,85 \cdot 0,21 \cdot 0,21 = 0,004,$$

$$P(H_{64})P(K_2/H_{64}) = P(H_{64})P(k_{11}/H_{64})P(k_{21}/H_{64})P(k_{32}/H_{64})P(k_{42}/H_{64}) = 0,10 \cdot 0,95 \cdot 0,85 \cdot 0,79 \cdot 0,78 = 0,05,$$

$$P(H_{64})P(K_3/H_{64}) = P(H_{64})P(k_{11}/H_{64})P(k_{21}/H_{64})P(k_{32}/H_{64})P(k_{43}/H_{64}) = 0,10 \cdot 0,95 \cdot 0,85 \cdot 0,79 \cdot 0,01 = 0,0006.$$

Отже, що в 64 кварталі найімовірніше II клас пожежної небезпеки. Аналогічно для всіх інших кварталів за формулою (3) визначаємо класи пожежної небезпеки.

У Можарівському лісництві виявлено I-IV класи пожежної небезпеки: I клас – 6485,6 га, II клас – 1210,3 га, III клас – 516 га та IV клас – 86,1 га.

Тепер за формулою Байєса (4) для кожного кварталу робимо оцінку настання пожежі за умови, що там уже виявлено один з класів пожежної небезпеки K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 , тобто

$$P(H_i/K_m) = \frac{P(H_i)P(K_1/H_i)}{P(K_m)}, \quad m=1,2,3,4,5.$$

Для 64 кварталу, де був виявлений II клас пожежної небезпеки, ймовірність настання пожежі становить

$$P(H_{64}/K_2) = \frac{P(H_{64})P(K_2/H_{64})}{P(K_2)} = \frac{0,05}{0,077} = 0,65.$$

3. Створення картографічної бази даних для оцінки ймовірності пожеж в лісових масивах

Як описано вище, ймовірність виникнення пожежі в певному лісовому кварталі визначається породно-віковим складом виділів, що знаходяться в оцінюваному кварталі, та станом зволоження ґрунтів в цьому виділі (табл. 3, 4). Для розрахунку ймовірності сформована картографічна база, що описує характеристики лісових кварталів та виділів. База даних включає два основні класи об'єктів, атрибути яких приведені нижче, та класифікаторів «Основний елемент лісу», «Вікова група», «Ознака вологості».

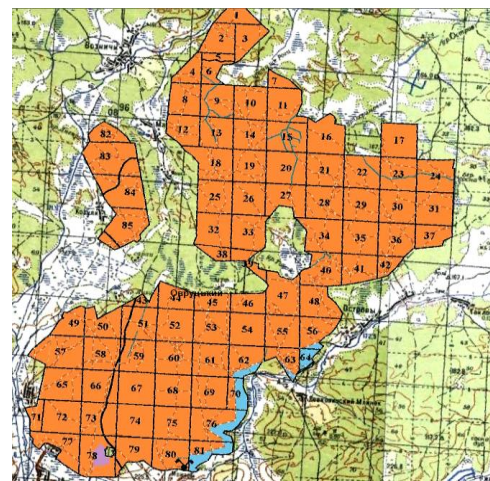
Таблиця 3. Клас лісових кварталів

Назва атрибута	Тип даних	Пояснення
KvartalNumber	Integer	Номер квартала
KvartalName	Text	Позначення квартала
PirolgyValue	Float	Пожежний індекс
Area	Float	Площа квартала

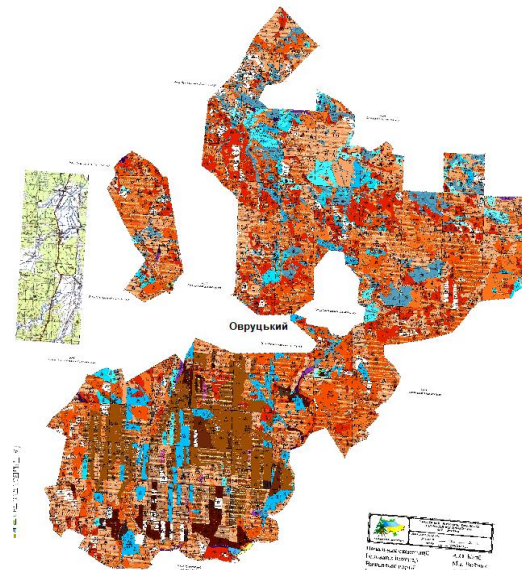
Таблиця 4. Клас лісових виділів

Назва атрибута	Тип даних	Пояснення
VydilNumber	Integer	Номер квартала
VydilName	Text	Позначення квартала
PirolgyValue	Float	Пожежний індекс
Area	Float	Площа квартала
ForestElement	Integer	Основний елемент лісу
OldGroup	Integer	Вікова група

Картографічна база даних була наповнена шляхом оцифровки растрових карт Можарівського лісництва (рис. 4). Результатом оцифровки є векторні шари кварталів та виділів з визначеними характеристиками лісових угідь, на основі яких розраховані ймовірності виникнення пожеж в лісових кварталах. На рис. 5 приведена тематична карта розподілу ймовірностей виникнення пожежі, розрахована за формулою Байєса, де кольорами позначені класи пожежної небезпеки: I клас – синій, II клас – червоний, III клас – оранжевий, IV клас – зелений.



а



б

Рис. 4. Растрова карта лісових кварталів (а) та лісових виділів (б) Можарівського лісництва (Fig. 4. Raster map of forest quarters (a) and forest allotments (b) of Mozharyiv forestry)

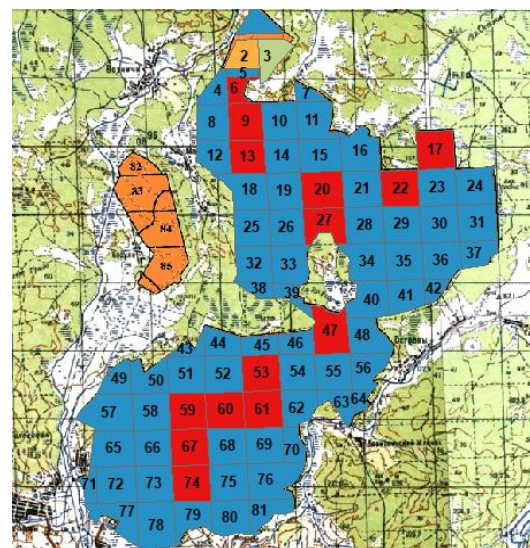


Рис. 5. Тематична карта розподілу ймовірностей виникнення пожежі (Fig. 5. Thematic map of the distribution of fire probabilities)

Цікавим є суміщення тематичної карти з растровим шаром пожежного індекса (рис. 6), що одержаний методом визначення спалених пожежами територій за допомогою формулам (1) та (2).

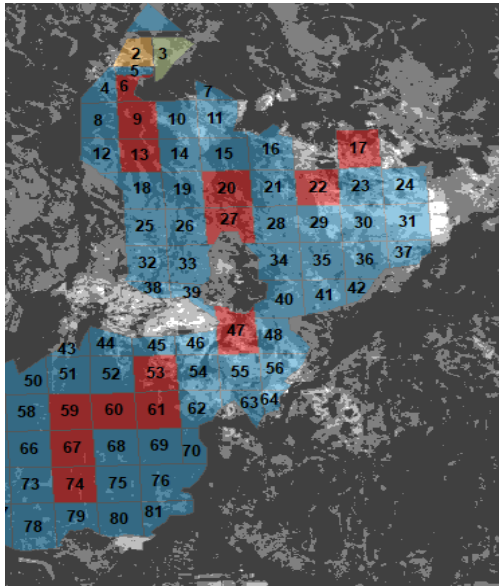


Рис. 6. Суміщення тематичної карти ймовірностей пожежі з шаром визначених наслідків пожежі
(**Fig. 6.** Combining the thematic map of fire probabilities with a layer of defined consequences of the fire)

Суміщення карти з растровим шаром показує, що наша прогнозна модель є правильною і її можна

використовувати спеціалістам в галузі лісового господарства.

Висновки

Розроблено інформаційну систему аналізу наслідків лісових пожеж із використанням технологій ДЗЗ та зроблено прогноз щодо виявлення пожежо-небезпечних територій. Проведено актуалізацію стану лісових угідь з використанням космічних знімків на основі керованої класифікації методом Байєса. Проаналізовано результати визначень нормалізованого індексу згарища NBR до та після пожежі на основі космічних знімків, зроблених супутником Landsat 8 протягом літнього періоду 2020 року в Овруцькому районі Житомирської області України. Також створено прогнозну модель ймовірного настання лісової пожежі методом Байєса. Створена тематична карта з розподіленням класів пожежної небезпеки по кожному лісовому кварталу. Для перевірки точності результатів створеної прогнозної моделі проведено суміщення тематичної карти з шаром визначених територій згарищ.

Дана інформаційна система є зручним і універсальним програмним продуктом, здатним адаптуватись до будь-якої лісової макросистеми. Подальшим напрямком вдосконалення є впровадження штучного інтелекту та машинного навчання, що дозволить ще більш точно та з максимальною швидкістю отримувати результат аналізу для швидкого реагування та прийняття рішень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ (REFERENCES)

1. Слободяник М.П. Використання методів ДЗЗ та ГІС-технологій для моніторингу лісових ресурсів. *Вісник геодезії та картографії*. № 1(88). 2014. С.27–31.
2. МIRONIUK B.B. Перспективи використання методу класифікації космічних знімків для лісової інвентаризації України. *Збалансоване природокористування*. № 2. 2015. С. 9–15.
3. Токар О., Король М., Гаврилюк С., Цуняк А. Використання супутникових знімків для оцінювання таксаційних показників лісових насаджень. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Геодезія, картографія і аерофотознімання»*. № 85. 2017. С.84-93.
4. Поморцева О.Є. Моделювання розташування екологічно небезпечних об'єктів за допомогою геоінформаційних систем. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Т. 29(68), № 6, Ч.2. 2018. С. 222 – 226.
5. Зацерковний В., Савков П., Пампуха І., Васецька К. Застосування технологій ГІС та ДЗЗ в задачах моніторингу лісових пожеж. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки*. № 2(44). 2020. С. 54–58.
6. Shvaiko, V., Bandurka, O., Shpuryk, V., & Havrylko, Y. V. Methods for detecting fires in ecosystems using low-resolution space images. *Informatyka, Automatyka, Pomiaru W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. No 11(1). 2021. Pp. 15-19.
7. Барабаш О., Бандурка О., Шпурік В., Свинчук О. Інформаційна система аналізу геоданих для відслідковування змін рослинності. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Том 5, № 4. С. 17–25. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.03>
8. Худов В., Кучук Г., Маковейчук М., Крижний А. Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Системи обробки інформації*. 2016. С. 77–80.
9. Kuchuk N., Kovalenko A., Tkachov V., Kuchuk H. Predicting traffic anomalies in container virtualization. *Computer and Information System and Technologies*. 2021. P. 25-26.
10. Васильев А.С., Краснящих А.В., Коротаев В.В., Лашманов О.Ю. и др. Разработка программно-аппаратного комплекса обнаружения лесных пожаров методом совмещения изображений. *Приборостроение*. Т.55, № 12. 2015. С. 50–55.
11. Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунев Б.Е. Интеллектуальное управление динамическими системами. М.: Физико-математическая литература, 2000. 352 с.
12. Гришин А.М. Общая математическая модель лесных пожаров и её приложения. *Физика горения*. Том 32, № 5, Томск, 2000. С. 35–54.
13. Куценко Л.М., Васильев С.В. Моделювання зовнішніх проявів надзвичайних ситуацій, як двофазних гетерогенних процесів. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Збірка наукових праць. Випуск 8. 2008. С. 115–123.
14. Грабарник П.А., Чертов О.Г., Чумаченко С.Г. Интеграция имитационных моделей для комплексной оценки экосистемных услуг лесов: методические подходы. *Информационные и вычислительные технологии в биологии и медицине*. Том 14, № 2. 2019. С. 488–499.
15. Макаров И.М., Лохина В.М. Интеллектуальные системы автоматического управления. М.: Физико-математическая литература, 2001. 576 с.

16. SDK [Электронный ресурс] / Wikimedia Foundation Inc. Сан-Франциско., 2009. URL: [http:// ru.wikipedia.org/wiki/SDK](http://ru.wikipedia.org/wiki/SDK)
17. Комаров А.С., Чертов О.Г., Быховец С.С., Припутина И.В., Шанин В.Н., Видягина Е.О., Лебедев В.Г., Шестибратов К.А. Воздействие осинового леса с коротким оборотом рубки на биологический круговорот углерода и азота в лесах бореальной зоны: модельный эксперимент. *Математическая биология и биоинформатика*. 2015. Т. 10. № 2. С. 398–415.
18. Припутина И.В., Фролова Г.Г., Быховец С.С., Шанин В.Н., Лебедев В.Г., Шестибратов К.А. Моделирование продуктивности лесных плантаций при разных схемах пространственного размещения деревьев. *Математическая биология и биоинформатика*. 2016. Т. 11. № 2. С. 245–262.

Received (Надійшла) 17.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.01.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

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

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

Моделирование лесных пожаров на основе прогностической модели Байеса и геоинформационных технологий

О. В. Барабаш, Е. И. Бандурка

Аннотация. Сегодня разнообразную информацию о лесных экосистемах можно получить с помощью методов дистанционного зондирования Земли. Использование космических данных мониторинга лесов является экономически выгодным, так как позволяет быстро получать объективную информацию, необходимую лесоводам для решения практических задач. Спутниковые данные обеспечивают обширный охват лесных угодий, высокую точность результатов, а также высокую частоту полученных данных. Для исследования были выбраны космические снимки территории Овручского района Житомирской области Украины летом 2020 года. Определение породного состава проведено методами управляемой классификации, а именно классификатором Байеса. Установлено, что 70% лесов являются сосновыми, в меньшем количестве встречаются осинового, грабового, березового, ольхового и ясеневые породы деревьев. По статистическим данным на протяжении 2000-2020 гг. в Украине было повреждено и уничтожено лесными пожарами 51,4 тыс. га лесных насаждений. Поэтому объективная и своевременная информация о последствиях пожаров необходима для решения широкого класса прикладных задач лесного хозяйства. Важной задачей при оценке эколого-экономического ущерба, нанесенного лесному хозяйству вследствие лесных пожаров, является определение площади поврежденных лесов. В работе рассматривается технология определения территории леса, где прошел пожар, с использованием космических снимков спутника Landsat 8. Для обнаружения сожженных пожаром территорий и уровней впечатления используется нормализованный индекс пожара NBR до и после пожара и индекс DNBR. Для прогнозирования лесных пожаров создана математическая модель на основе теоремы Байеса и создана тематическая карта с классами пожарной опасности поквартально. Для проверки точности результатов созданной прогнозной модели произведено совмещение тематической карты со слоем определенных территорий пожаров. Данный программный продукт достаточно гибок и универсален, он может быть легко адаптирован для применения не только для определения сожженных лесных угодий, но и для других территорий.

Ключевые слова: моделирование лесных пожаров; информационная система; космические снимки; дистанционное зондирование Земли; Quantum GIS; индекс пожаров; формула Байеса; вероятность пожара.

Modeling of forest fires based on the Bayesian forecast model and geoinformation technologies

Oleg Barabash, Olena Bandurka

Abstract. Today, a variety of information about forest ecosystems can be obtained using remote sensing methods. The use of space data for forest monitoring is cost-effective because it allows you to quickly obtain the objective information needed by foresters to solve practical problems. Satellite data provide wide coverage of forest lands, high accuracy of results, as well as high frequency of data obtained. Space images of the Ovruch district of the Zhytomyr region of Ukraine in the summer of 2020 were selected for the study. Determination of breed composition was carried out by the methods of controlled classification, namely the Bayesian classifier. It was found that 70 % of forests are pine, less aspen, hornbeam, birch, alder and ash tree species. According to statistics, during 2000-2020, 51.4 thousand hectares of forest plantations in Ukraine were damaged and destroyed by forest fires. Therefore, objective and timely information on the consequences of fires is needed to solve a wide range of applied problems of forestry. An important task in assessing the environmental and economic damage caused to forestry as a result of forest fires is to determine the area of damaged forests. The paper considers technologies for determining the area of the forest where the fire took place, using space images of the Landsat 8 satellite. The normalized NBR fire index before and after the fire and the DNBR index are used to identify areas burned by fire and impression levels. To predict forest fires, a mathematical model based on Bayes' theorem was created and a thematic map with fire hazard classes on a quarterly basis was created. To check the accuracy of the results of the created forecast model, the thematic map was combined with a layer of defined fire areas. This software product is quite flexible and versatile, it can be easily adapted for use not only to identify burned forest lands, but also for other areas.

Keywords: information system; space imagery; remote sensing of the Earth; Quantum GIS; fire index; Bayesian formula; probability of fire.

А. А. Проценко, В. Г. Іванов

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ДОДАТКУ E-NETSIM ПРИ ВІЗУАЛЬНОМУ МОДЕЛЮВАННІ РУХУ АВТОНОМНИХ РОБОТІВ

Анотація. Основне завдання методів пошуку шляху – генерувати можливий шлях через ділянку середовища при обході перешкод і мінімізації довжини шляху. Існуючі методи зосереджені на найкоротшому геометричному шляху до мети і не враховують різні параметри, такі як споживання енергії або складність ділянок шляху. У цій статті пропонується метод пошуку шляху та визначення його оптимальності за допомогою мереж Петрі. Окрім генерування рішень на основі кількох параметрів, цей метод дозволяє розширити візуальний зворотний зв'язок. При розрахунку оптимальності моделі використовують геометричну відстань від точки входу робота до мети по визначеному маршруту та витрати абстрактної величини енергії на пересування кожним маршрутом. **Об'єктом дослідження** є мережі Петрі та їх використання для моделювання процесу створення маршрутів та пошуку шляху для автономних роботів. **Предметом дослідження** є математичний апарат мереж Петрі та доцільність їх застосування при моделюванні процесу створення маршрутів та пошуку шляху для автономних роботів. **Метою наукової роботи** є демонстрація переваг мереж Петрі для візуального моделювання процесу пошуку шляху та руху автономних роботів. **Висновки.** Представлена методика доцільна до застосування при моделюванні процесу пошуку шляху та надає комплексну статистику для подальшої обробки та аналізу.

Ключові слова: автономний робот; пошук шляху; граф шляху; навігація; перешкоди; мережі Петрі; візуальне моделювання; E-NetSim.

Вступ

Дослідження у сфері пошуку шляху для автономних роботів (АР) є актуальними вже більше тридцяти років. Основною задачею цих методів є генерація можливого шляху через ділянку середовища з оминанням перешкод та мінімізацією довжини шляху. На даний момент існує велика кількість ефективних методів [1] пошуку шляху, однак більшість з них приймає до уваги найкоротший геометричний шлях до мети і не приймає до уваги такі параметри як енерговитрати або складність ділянок шляху. В залежності від середовища, конструкції роботу та конфігурації керування та методу руху, вибір оптимального для руху маршруту може змінюватись.

Додатковою проблемою є недостатній рівень візуальної інформації, що надається потенціальному оператору під час процесу планування шляху. При умовах, що навколишнє середовище перешкоджає зв'язку робота з оператором під час руху, можливість локалізувати місце знаходження робота та статус виконання ним поставленої задачі є необхідністю. Використання мереж Петрі надає можливість моделювання затримок на шляху, а також демонстрацію руху декількох АР на одному маршруті за рахунок моделювання черг та проходів.

Моделювання за допомогою мереж Петрі дозволяє отримати множину комплексних характеристик для оцінки оптимальності маршруту. Використання мереж Петрі при процесі пошуку шляху не нове. Клотцер та Махулея [2, 3] використовують спеціальний клас мереж Петрі, який називають кінцевим автоматом, для координації руху багатьох роботів. Моханта та Пархі розробили модель мереж Петрі, яка використовується щоб уникнути зіткнення між роботами та уникнення перешкод під час навігації [4]. У [5] запропоновано структуру математичної досяжності для мереж Петрі для навігації мобі-

льного робота. Таким чином, мережі Петрі звичайно використовуються для складання планів виконання задач одним або групою роботів, тимчасом як метою цієї роботи є розширення сфери застосування на алгоритми пошуку та оптимізації шляху. Мережі Петрі можливо комбінувати з великою кількістю методів пошуку шляху, при умовах що метод створює вузли для переміщення на карті.

Середовище візуального моделювання E-NetSim [6] дозволяє симулювати роботу алгоритмів пошуку шляху та оптимізації на основі мереж Петрі та дозволяє отримати візуальну інформацію під час моделювання.

Постановка проблеми

Припустимо, що існує деяка ділянка простору з точкою входу робота, перешкодами, та метою, яку треба досягти. Для отримання доцільного результату моделювання повинне задовільнити наступні умови:

- виконання розрахунку геометричної довжини існуючих шляхів від точки входу до мети.
- генерація та збереження статистики про пересування роботу та вторичних характеристик, таких як енерговитрати.
- розрахунок оптимального маршруту, використовуючи геометричну довжину та вторичні характеристики.

На рис. 1 зображено ділянку простору з перешкодами, перешкодами, на якій розмічено (одним з методів пошуку) граф з вузлів, відмічено початок та кінець та виділено 4 маршрути.

Першим кроком є перетворення графу $G = [V, E]$ на орієнтований граф $DG = [V_d, E_d, \rho]$. Вважаючи, що кожне ребро що входить у кінцеву вершину, є частиною маршруту від старту до фінішу, процес починається з пошуку індексу кінцевої верхівки F_n у множині вузлів V . Ця верхівка позначається V_i та додається до множини вершин орієнтованого графу V_d (Лістинг 1).

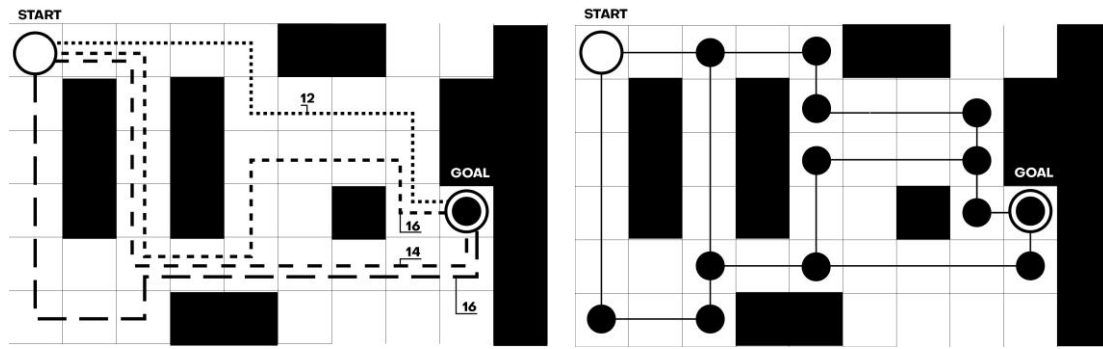


Рис. 1. Мапа ділянки з перешкодами та маршрути ((Fig. 1. Area map with obstacles and routes))

```

Input:  $F_n, G = [V, E]$  *Finish, Undirected graph*
Output:  $DG = [V_d, E_d, \varphi]$  *Directed graph*
Locate  $F_n$  on a graph  $G$ ;
Set  $F_n$  as  $V_i$ ;
function add_node( $V_i$ ):
  Add  $V_i$  to  $V_d$ ;
  For each  $E_j$  connected to  $V_i$  :
    if  $E_j \in E_d$ ;
      pass;
    else:
      Add  $E_j$  to  $E_d$ ;
      Set  $V_i$  as  $\varphi_i\_head$ ;
      Locate  $V_c$  connected by  $E_j$ 
      Set  $V_c$  connected by  $E_j$  as  $\varphi_j\_tail$ ;
      For each  $V_{c_n}$ :
        add_node( $V_{c_n}$ )
Return  $DG$ ;

```

Лістинг 1

Після знаходження верхівки, алгоритм знаходить усі ребра E_j що входять у F_n та додає їх у до множини ребер орієнтованого графу E_d . До кожного ребра, що було додано до E_d , до множини напрямків φ додається напрямок $(\varphi_i_head, \varphi_j_tail)$ де φ_i_head це V_i а φ_j_tail є іншою вершиною з E_j . Алгоритм проходить усі вершини графу послідовно.

Наступним кроком є побудова структури Мережі Петрі $PN = [P, T, I, O]$ на основі орієнтованого графу $DG = [V, E, \varphi]$.

Мережа Петрі це графічний та математичний інструмент для моделювання систем. Формально [7], мережа Петрі описується як

$$PN = [P, T, I, O], \quad (1)$$

де P – множина місць, $P = [P_1, P_2, P_3 \dots P_n]$, де $n \in \mathbb{N}$, T – множина транзакцій, або переходів, $T = [T_1, T_2, \dots T_m]$, де $m \in \mathbb{N}$, I – множина вхідних функцій, тобто пар $P \times T \rightarrow \{0, 1\}$, що поєднує переходи та транзакції, O –

множина вихідних функцій, тобто пар $T \times P \rightarrow \{1, 0\}$, що поєднує транзакції та переходи.

Перетворення орієнтованого графу у мережу Петрі зображено наступному алгоритмі, що починається з пошуку індексу початкової верхівки St у множині вузлів V . Ця верхівка позначається V_i . Далі, алгоритм створює транзакцію T_i та додає V_i і T_i до множин P та T відповідно. Після цього, формується вхідна пара I_i що додається до множини I . Для кожної φ_j_tail що включає у себе V_i , формується вхідна пара O_i що додається до множини O . Алгоритм проходить усі вершини графу, що спрямовані від старту до фінішу, послідовно.

```

Input:  $St, DG = [V, E, \varphi]$  *Start, Directed graph*
Output:  $PN = [P, T, I, O]$  *Petri Net*
Locate  $St$  on a graph  $DG$ ;
Set  $St$  as  $V_i$ ;
function add_petri_pair( $V_i, T_i$ ):
  Create  $T_i$ ;
  Add  $V_i$  to  $P$ ;
  Add  $T_i$  to  $T$ ;
  Add  $I_i(P_i \times T_i \rightarrow \{0, 1\})$  to  $I$ ;
  For each  $V_j \in \varphi_i\_tail$ :
    Add  $O_j(T_i \times P_j \rightarrow \{1, 0\})$  to  $O$ ;
    add_petri_pair( $V_j, T_i$ );
Return  $PN = [P, T, I, O]$ ;

```

Лістинг 2

Сформовану мережу Петрі зображено на рис. 2. Мережа під'єднана до генератора $G1$ що генерує новий маркер кожні 100 відносних одиниць часу. Маркери акумулюються у чергу $Q1$.

Кожна транзакція T має заданий змінною час транзакції та функцію транзакції (рис. 3) У даному випадку, функція переходу змінює загальний час очікування маркеру.

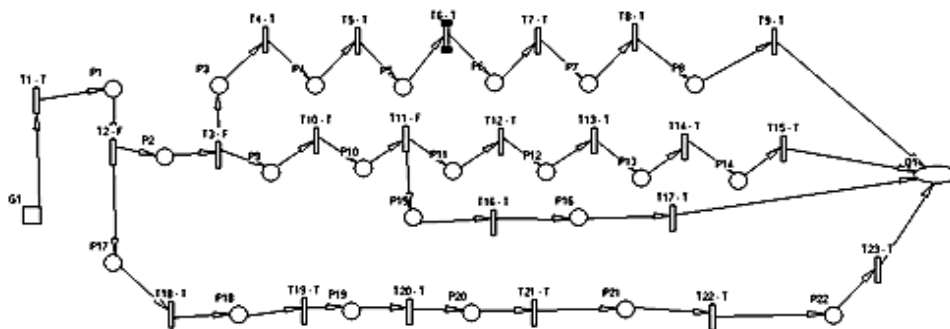


Рис. 2. Сформована мережа Петрі ((Fig. 2. Constructed Petri Net))

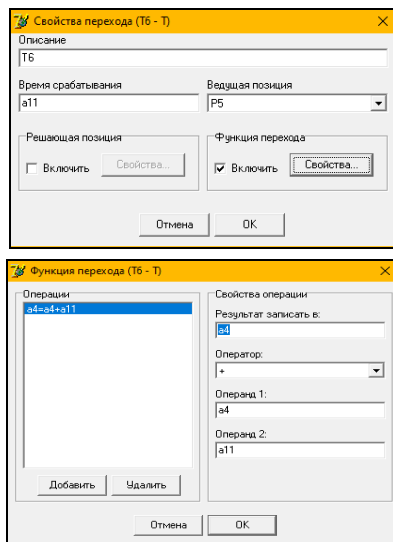


Рис. 3. Вікно властивостей транзакції та функція транзакції (Fig. 3. Transaction property window and transaction function)

Моделювання процесу пошуку шляху

Сформована абстрактна модель пошуку відображає хід роботи (маркеру) з затримками на кожній ділянці шляху. Якщо припустити, що маркер проходить одну відносну одиницю шляху за певний, заздалегідь визначений час, який еквівалентний часу затримки симуляції, то величина затримки на кожній ділянці буде дорівнювати довжині цієї ділянки у відносних одиницях. Результат моделювання з заданими відстанями зображено на рис. 4. Основною перевагою використання мереж Петрі є можливість моделювання процесу пошуку шляху з комплексними характеристиками.

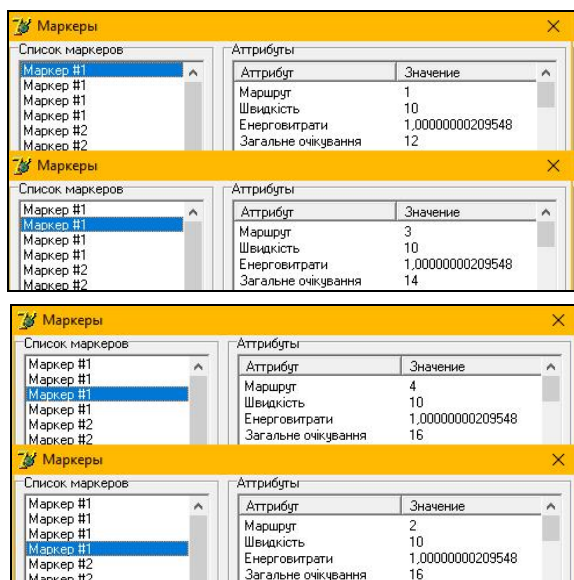


Рис. 4. Результат моделювання з фіксованою швидкістю (Fig. 4. The result of simulation with a fixed speed)

Додамо до попередньої моделі додатковий параметр — складність шляху α (рис. 5). Тепер кожен маркер буде мати дві унікальні характеристики: швидкість V і енерговитрати C . Таким чином час проходження кожного маркера через різні маршрути буде залежати не тільки від довжини цього маршруту.

Завдяки цьому, ми можемо визначити оптимальний маршрут за двома критеріями.

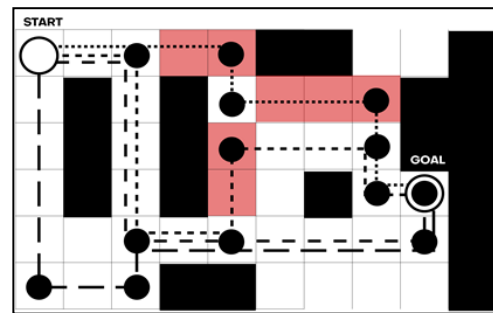


Рис. 5. Мапа ділянки з перешкодами, ускладненнями шляху та маршрутами (Fig. 5. Map of the area with obstacles, road complications and routes)

Під час процесу моделювання додаток E-Net-Sim показує параметри кожного маркера (рис. 6) на кожному маршруті у будь який момент часу. Це додатково надає оператору необхідну інформацію про процес пошуку шляху і надає можливості для коригування.

На ділянках, які представлені транзакціями T4, T6 та T12 складність маршруту збільшена у α разів $t_i = \alpha L_i / V_j$. Під час даного моделювання параметр α становив 10, параметр V — випадковою величиною $V = R(1,10)$, параметр C — випадковою величиною $V = R(1,20)$ для кожного маркера.

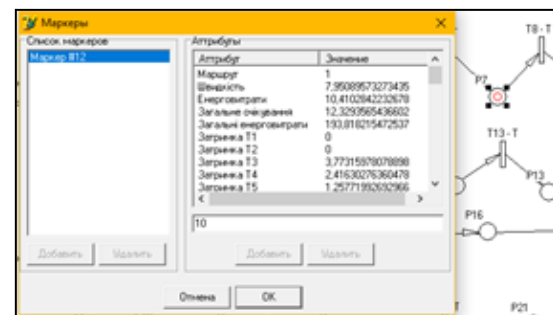


Рис. 6. Характеристики маркера у даний момент (Fig. 6. Characteristics of the marker at the moment)

Графік результатів моделювання за часом (Σt) зображено на рис. 7, за енерговитратами (ΣC) — на рис. 8.

Обработка результатов моделирования

Використовуючи параметри Σt та ΣC , можливо визначити оптимальний маршрут для кожного АР, в залежності від ваги кожного параметру для процесу оптимізації. На рис. 9 зображено графік оптимальності кожного маршруту, де критерій затримки має вагу 0.7, а критерій енерговитрат — вагу 0.3. Результати оптимізації приведено в табл. 1 (М — місце у кожному експерименті). Керуючись даними результатами, можна встановити, що маршрут №1 є оптимальним у 54.45% випадків. На рис. 10 зображено графік оптимальності кожного маршруту, де критерій затримки має вагу 0.3, а критерій енерговитрат — вагу 0.7. Результати оптимізації приведено в табл. 2. За даними параметрами маршрут №3 є оптимальним у 85.14% випадків.

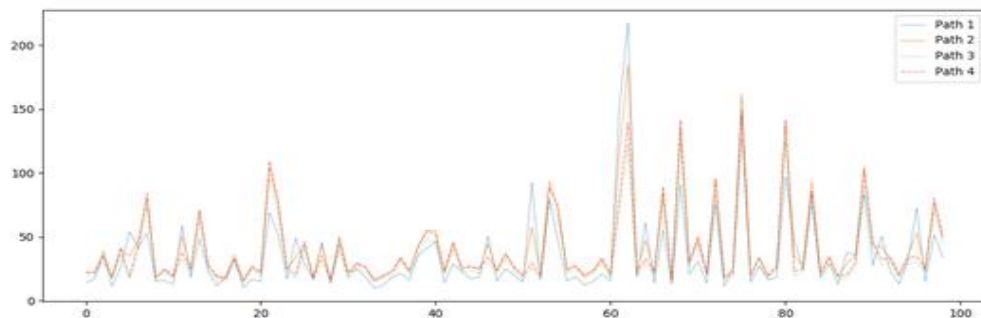


Рис. 7. Графік результатів моделювання за часом (Σt) (Fig. 7. Graph of simulation results by time (Σt))

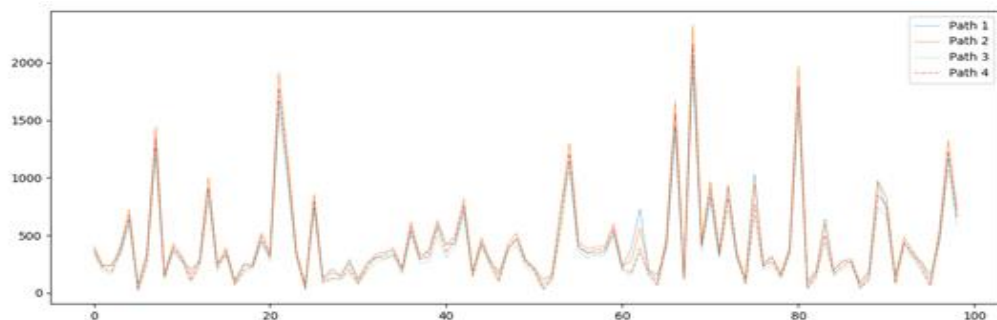


Рис. 8. Графік результатів моделювання за енерговитратами (ΣC) (Fig. 8. Graph of energy consumption simulation results (ΣC))

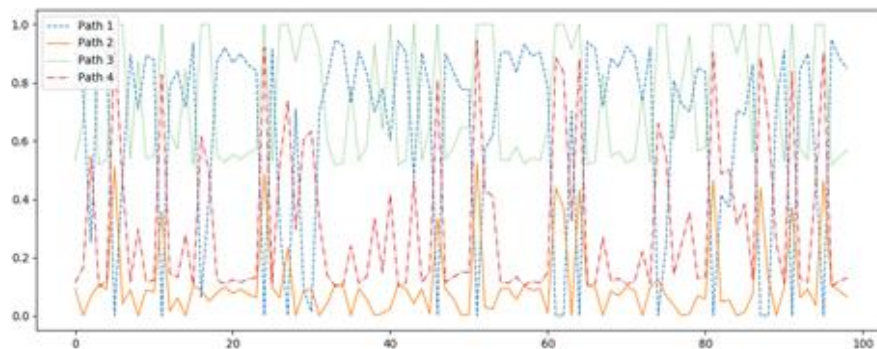


Рис. 9. Графік оптимальності кожного маршруту з параметрами (0.7, 0.3) (Fig. 9. Graph of optimality of each route with parameters (0.7, 0.3))

Таблиця 1 – Результати оптимізації з параметрами (0.7, 0.3)

М	Шлях			
	№1	№2	№3	№4
1	55	0	44	0
2	20	0	55	24
3	7	22	0	70
4	17	77	0	5

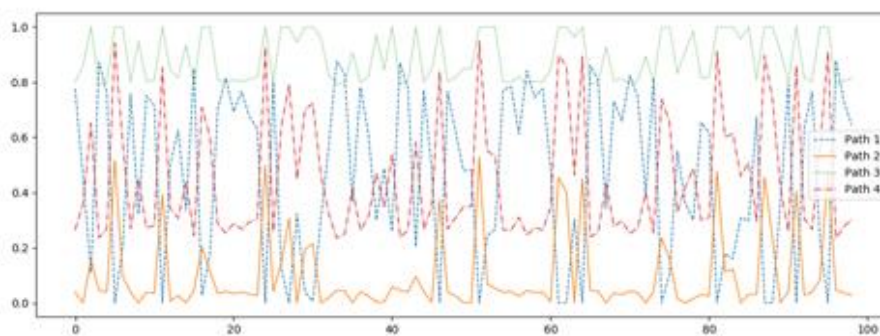


Рис. 10. Графік оптимальності кожного маршруту з параметрами (0.3, 0.7). (Fig. 10. Graph of optimality of each route with parameters (0.3, 0.7).)

Таблиця 2 – Результати оптимізації з параметрами (0.3, 0.7)

М	Шлях			
	№1	№2	№3	№4
1	13	0	86	0
2	42	0	13	44
3	23	21	0	55
4	21	78	0	0

Очікувано, результати у табл. 1 та 2 показують що, в залежності від вибору ваги різних критеріїв, вибір оптимального маршруту змінюється.

Висновки

Ця стаття описує використання моделі мережі Петрі для вирішення проблеми пошуку шляху для автономних роботів.

Як можна побачити з результатів експерименту, моделювання за допомогою мережі Петрі дозволяє знайти не тільки оптимальний результат використовуючи геометричну довжину маршруту, але й оптимальний результат з використанням додаткових характеристик, таких як енерговитрати.

Аналіз статистики, отриманої у результаті моделювання, допомагає спростити процес планування

навігації за умови використання роботів з різними технічними характеристиками.

Алгоритми описані у цій роботі можуть бути застосовані для реальних проблем планування шляху для роботів, особливо, коли умови навколишнього оточення не дозволяють відстежувати та керувати рухом робота на всій довжині маршруту.

Середовище моделювання E-NetSim показало себе успішним інструментом для моделювання різноманітних процесів за допомогою мереж Петрі. Набір інструментів представлений цим пакетом допомагає відстежувати рух маркерів у реальному часі та збирати цінну та різноманітну статистику про результати моделювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ (REFERENCES)

1. Проценко А., Иванов В. Класичні методи планування шляху для мобільних роботів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: ПНТУ, 2019. Т. 3 (55). С. 143-151. doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.3.143>.
2. Kloetzer, M., Mahulea, C. A Petri net based approach for multi-robot path planning. *Discrete Event Dyn. Syst.* 2014. Vol. 24. pp. 417–445. doi: <https://doi.org/10.1007/s10626-013-0162-6>.
3. C. Mahulea, Ed. Montijano, M. Kloetzer, Distributed Multirobot Path Planning in Unknown Maps Using Petri Net Models. *IFAC-PapersOnLine*. 2020. Vol. 53, Is. 2. Pp. 2063-2068. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2521>.
4. J.C. Mohanta, D.R. Parhi, S.K. Patel. Path planning strategy for autonomous mobile robot navigation using Petri-GA optimisation, *Comp. & Electr. Eng.* 2011. Vol. 37, Is. 6. Pp. 1058-1070. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2011.07.007>.
5. Gunardi, Yudhi, Dirman Hanafi, Fina Supegina, and Andi Adriansyah. Mathematics base for navigation mobile robot using reachability Petri net. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*. 2018. 10, No. 1-9. Pp. 65-69.
6. Гавриленко С. Ю., Иванов В. Г. Разработка системы графического описания и моделирования распределенных программных объектов при проектировании информационных систем. *Системи обробки інформації*. 1 (2014): 10-13.
7. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М. : Мир, 1984. 264 с.

Received (Надійшла) 15.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.01.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Проценко Андрій Андрійович – аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Andrii Protsenko – PhD student, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: andrii.protsenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8754-7444>.

Іванов Валерій Геннадійович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри системотехніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Valeriy Ivanov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Systems Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: valeriy.ivanov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6419-3759>.

Using the E-Netsim application for visual simulation of the movement of the autonomous robots

Andrii Protsenko, Valeriy Ivanov

Abstract. The main task of path search methods is to generate a possible path through a section of the environment while bypassing obstacles and minimizing the path length. Existing methods focus on the shortest geometric path to the target and do not take into account various parameters, such as energy consumption or the complexity of sections of the path. This article proposes a method for finding a path and determining its optimality using Petri nets. In addition to generating solutions based on several parameters, this method allows you to expand the visual feedback. When calculating the optimality of the model using the geometric distance from the entry point of the robot to the goal along a certain route and the cost of the abstract amount of energy to move each route. **The object of research** is Petri nets and their use to model the process of creating routes and finding a way for autonomous robots. **The subject of research** is the mathematical apparatus of Petri nets and the feasibility of their use in modeling the process of creating routes and finding a way for autonomous robots. **The research aims** to demonstrate the benefits of Petri nets for visual modeling of the process of finding the path and motion of autonomous robots. **Conclusions.** The presented technique is suitable for use in modeling the process of finding a way and provides comprehensive statistics for further processing and analysis.

Keywords: autonomous robot; path search; path graph; navigation; obstacles; Petri nets; visual modeling; E-NetSim.

Использование приложения E-Netsim при визуальном моделировании движения автономных роботов

А. А. Проценко, В. Г. Иванов

Аннотация. Основная задача способов поиска пути – генерировать вероятный путь через участок среды при обходе препятствий и минимизации длины пути. Существующие методы сосредоточены на кратчайшем геометрическом пути к цели и не учитывают разные параметры, такие как потребление энергии или сложность участков пути. В данной статье предлагается способ поиска пути и определения его оптимальности с помощью сетей Петри. Помимо создания решений на основе нескольких параметров, этот метод позволяет расширить визуальную обратную связь. При расчете оптимальности модели используют геометрическое расстояние от точки входа робота до цели по определенному маршруту и затраты абстрактной величины энергии на передвижение по каждому маршруту. **Объектом исследования** являются сети Петри и их использование для моделирования процесса создания маршрутов и поиска для автономных роботов. **Предметом исследования** является математический аппарат сети Петри и целесообразность их применения при моделировании процесса создания маршрутов и поиска пути для автономных роботов. **Целью научной работы** является демонстрация преимуществ сети Петри для визуального моделирования процесса поиска пути и движения автономных роботов. **Выводы.** Представленная методика целесообразна для применения при моделировании процесса поиска пути и предоставляет комплексную статистику для дальнейшей обработки и анализа.

Ключевые слова: автономный робот; поиск пути; граф пути; навигация; препятствия; сети Петри; визуальное моделирование; E-NetSim.

Adaptive control methods

UDC 004.94

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.1.05>

Vadim Kolumbet, Olha Svynchuk

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky KPI", Kyiv, Ukraine

MULTIAGENT METHODS OF MANAGEMENT OF DISTRIBUTED COMPUTING IN HYBRID CLUSTERS

Abstract. Modern information technologies include the use of server systems, virtualization technologies, communication tools for distributed computing and development of software and hardware solutions of data processing and storage centers, the most effective of such complexes for managing heterogeneous computing resources are hybrid GRID- distributed computing infrastructure combines resources of different types with collective access to these resources for and sharing shared resources. The article considers a multi-agent system that provides integration of the computational management approach for a cluster Grid system of computational type, the nodes of which have a complex hybrid structure. The hybrid cluster includes computing modules that support different parallel programming technologies and differ in their computational characteristics. The novelty and practical significance of the methods and tools presented in the article are a significant increase in the functionality of the Grid cluster computing management system for the distribution and division of Grid resources at different levels of tasks, the ability to embed intelligent computing management tools in problem-oriented applications. The use of multi-agent systems for task planning in Grid systems will solve two main problems - scalability and adaptability. The methods and techniques used today do not sufficiently provide solutions to these complex problems. Thus, the scientific task of improving the effectiveness of methods and tools for managing problem-oriented distributed computing in a cluster Grid system, integrated with traditional meta-planners and local resource managers of Grid nodes, corresponding to trends in the concept of scalability and adaptability.

Keywords: multiagent control; distributed computing; GRID; Grid clusters; multiagent modeling; intelligent agent; multiagent system; meta-planners; simulation.

Introduction

Common meta-planners do not fully take into account the specific requirements of users for resources when allocating these resources. Therefore, administrators and users of distributed computing environment resources have to "manually" solve the problems of selecting and providing resources, which can be quite versatile. This causes difficulties in solving these problems and raises the problem of automating and intellectualizing the processes of solving them. The most popular approach to solving this problem is the use of multi-agent systems (MAS) to control computing [1]. In this paradigm, two main approaches to multi-agent computing management can be distinguished [2]: interaction of the MAS with local resource managers of Environment nodes in order to optimize resource use and integration of a user application with a multi-agent resource selection system, the purpose of which is to increase the efficiency of problem solving by the application.

Currently, there is a wide range of tools for building distributed computing environments. These include, for example, general-purpose Google App Engine, Amazon EC2, Microsoft Azure, specialized Unicore systems, Globus Toolkit, Math Cloud, the Opa programming language, and systems implemented based on the Intelligent Problem-Solving Environment concept. The main direction in systems for building distributed computing environments is usually done to simplify the process of creating services. In such systems, computing management is implemented either using common meta-planners such as Workload Management System or Grid

Way, or using specialized system tools. Thus, today it is relevant to apply a multi-agent approach for managing distributed computing at the Grid system level and computing at the application level.

Analysis of recent research and publications. Analysis of modern scientific and information sources in the field of computing management research of cluster grid systems of computational type. In the research of Kostromin R. A., Feoktistov A. G., The problems of multi-agent control systems for distributed computing are considered.

In [9] methods and tools for managing problem-oriented [8] distributed computing in a cluster Grid system are used. Bychkov I. V. [11] focus their analysis on well-known methods of multi-agent control of a computing system based on meta-monitoring and simulation.

According to the construction principle, there are analytical, simulation, and statistical mathematical models.

Analytical models of control and metaplaning in Grid systems are described in the works of Toporkov V. V., Yemelyanov D. M., Toporkov A. S. [7], Batool K., Niazi M.A. [12], Budaev D., Amelin K., Voschuk G. [13], in which a mathematical, basic model of equations is created, and an approach to hybrid modeling using complex networks and agent-based models is considered.

However, the existing methods [6, 10] of managing planners in systems with a hybrid structure, in conditions of uncertainty [1, 5], require a large number of complex mathematical calculations [4, 3], so we consider methods of a multi-agent approach for managing distributed computing at the Grid system level and managing

calculations at the application level distributed computing in a cluster Grid system, integrated with traditional meta-planners and local resource managers of grid system nodes to optimize the work of planners.

The aim of the study is to identify the features of applying multi-agent approach methods for managing distributed computing at the Grid system level and managing computing at the application level.

Main part

1. Managing calculations at the Grid system level. Computing management at the Grid system level is implemented by the MAS with a given organizational structure.

Agents' actions are coordinated using the general rules of group behavior. Agents function according to the specified roles, and each role has its own rules of behavior in the virtual community of agents. The MAS includes resource allocation agents and a management agent. Resource allocation agents can be combined into virtual communities (VC). In the various VC that arise in

the MAS, agents can coordinate their actions through cooperation or rivalry. The task of the MAS at the Grid system level is to obtain such a distribution of task flows entering the system and store indicators of the quality of functioning of this system within the limits set by the Grid system administrator.

A task is a specification of the problem - solving process that contains information about the necessary computing resources, running application programs, input and output data, and other necessary information. All tasks are divided into classes according to their computational characteristics [2].

Indicators of the quality of functioning of the Grid system include: average indicators of time spent in queues, useful coefficients of nodes of the Grid system and the system as a whole, successful completion coefficient and the average cost of performing tasks of different classes in nodes of the Grid system and in the system as a whole.

A block diagram of the computing management system at the Grid system level is shown in Fig. 1.

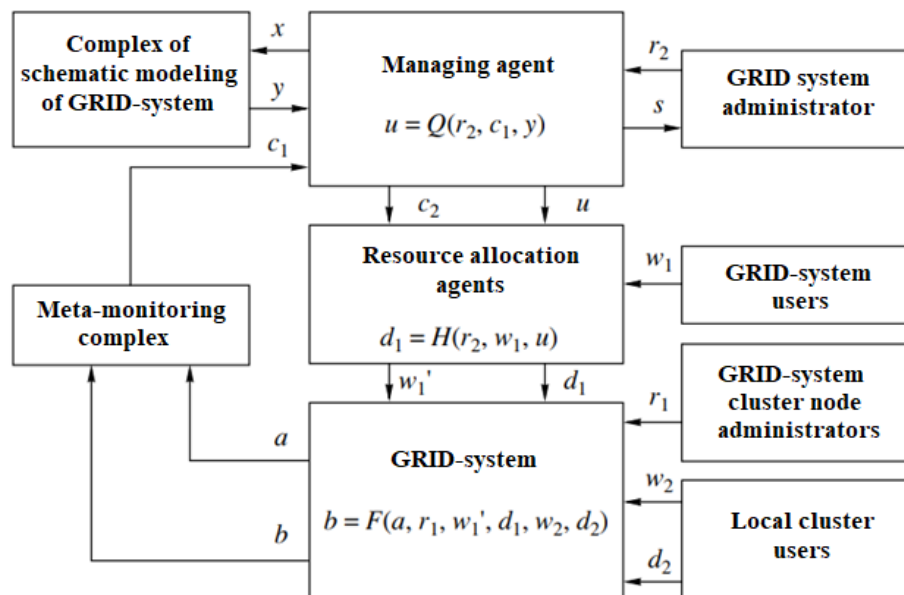


Fig. 1. Block diagram of the computing management system

In this diagram, the control object is a Grid system, the nodes of which are represented by heterogeneous computing clusters (CC), including hybrid ones. External perturbations for the control object are the flow w_1 grid system user tasks and flow w_2 local users of computing clusters. Distribution results d_1 and d_2 flows w_1 and w_2 CC software is the control effect of MAS and local users of the computing cluster on the control object, respectively. The specified action for the control object is the vector of parameters of administrative policies of the computing cluster r_1 .

Resource allocation agents intercept thread tasks w_1 in order to configure the computer system requirements contained in tasks in more detail. So, the flow w_1 modified into a flow w_1' . Distribution d_1 flow w_1' it is carried out by resource allocation agents on the basis of economic mechanisms for regulating the supply and

demand of these resources [3]. Distribution d_2 flow w_2 set by local CC users.

Task flows w_1 and w_2 they are characterized by the following properties: dynamism; heterogeneity; lack of feedback; originality; stationarity.

Information about the computational characteristics of Grid system nodes is collected by a meta-monitoring Complex [4] using Control and measuring devices in the form of a data file structure a . Information about the current indicators of the volume of computing work in the nodes of the Grid system is also collected by the meta-monitoring complex in the form of a data file structure b . It is assumed that between the components of structure b on the one hand and the computational characteristics of nodes a , given by the action r_1 for the task flow management object w_1' and w_2 , distributions d_1 and d_2 on the other hand there is some abstract connection

$$b = F(a, r_1, w'_1, d_1, w_2, d_2).$$

Parametric configuration of algorithms for the operation of resource allocation agents of a particular virtual community is carried out by applying the obtained control actions, taking into account weighting factors that reflect the computational features of virtual community nodes.

Therefore, let x and y be the vectors of the input and observed variables of the Simulation Model [7] of the Grid system.

The observed variables reflect indicators of the quality of functioning of the Grid system. Vector elements x_i , $i = \overline{1, n_x}$ and y_j , $j = \overline{1, n_y}$ have respectively areas X_i and Y_j valid values.

It is assumed that the effects of the input variables on the observed variables were studied using factor analysis [5] in advance - when building and testing a simulation model of a Grid system. It is also assumed that for each j -th element of the vector y the administrator of the Grid-system sets the criterion for calculating the estimate y_j quality of value and its limit values y_j^{min} and $y_j^{max} \in Y_j$.

A number of elements of the vector x play the role of variable variables, forming a subset X^* and are identified with the elements of the vector

$$u: u_q \equiv x_i, \\ q = \overline{1, n_u}, i = \overline{1, n_x}, 1 \leq n_u < n_x.$$

As a rule, when solving practical problems of computational control in the Grid system in the process of simulation, it is advisable to use ≤ 8 . The number of values of variable variables is determined based on the ratio:

$$\frac{t_m \times \prod_{q=1}^{n_u} z_q}{n_c} \leq T_2, \quad (1)$$

where t_m - the average run time of the simulation model, which is determined by the meta-monitoring complex based on the computational history of the model runs, $z_q < 0$ - the number of variable values of the q -th variable, n_c - the number of cores of the node in which the control agent is located, $n_u < n_c$.

The initial values of the variables used are the base values that correspond to the default values of the configuration parameters of the current Grid computing control system.

The remaining values of the variables are selected from the relevant areas of allowable values, taking into account the effects of the influence of variable variables on the observed variables.

The values of non-variable input variables, which are elements of the vector x , are set based on the corresponding numerical information represented by the vectors r_2 and c_1 .

In the process of modeling the simulation of the process of functioning of the Grid-system is performed by conducting various parallel calculations and a set of V variants of values of the observed variables is formed: values $y_{jk} \in Y_j$ is an element of the k -th variant $v_k \in V$ for the variable y_j , $j = \overline{1, n_y}$, $k = \overline{1, n_v}$.

Selection from the set V of the subset $V^* \subseteq V$ variants of the values of the observed variables in order to further determine the values of the elements of the vector u is multicriteria.

Choice of options for the subset V^* carried out by the managing agent either on the basis of the lexicographic method, if the administrator of the Grid system can order the observed variables by significance, or otherwise on the basis of the majority method. The lexicographic method of selection of variants of values of the observed variables uses the following rule of multicriteria choice [6]:

$$V^* = \{v_k \in V: (\forall_{vl} \in V \exists p \in \overline{1, n_y - 1} : \\ (\hat{y}_{1k} = \hat{y}_{1l}) \wedge \dots \wedge$$

$$\wedge (\hat{y}_{pk} = \hat{y}_{pl}) \wedge (\hat{y}_{(p+1)k} > \hat{y}_{(p+1)l})) \},$$

where

$$y_j^{min} \leq y_{jk} \leq y_j^{max},$$

$$j = \overline{1, n_y}, \quad k \in \overline{1, n_v}, \quad l \in \overline{1, n_v}, \quad k \neq l.$$

The majority method of selection of variants of values of the observed variables uses the following rule of multicriteria choice [6]:

$$V^* = \{v_k \in V (\neg \exists v_l V: \\ \sum_{j=1}^{n_y} \text{sign}(\hat{y}_{jl} - \hat{y}_{jk}) > 0) \}, \quad (3)$$

where

$$\text{sign}(0) = 0,$$

$$y_j^{min} \leq y_{jk} \leq y_j^{max},$$

$$j = \overline{1, n_y}, \quad k \in \overline{1, n_v}, \quad l \in \overline{1, n_v}, \quad k \neq l.$$

The application of the above methods of multicriteria selection is due to the fact that they have the least computational complexity compared to other known methods of solving this problem, easy to implement and the managing agent requires minimal additional information from the Grid system administrator.

Thus, resource allocation agents exert managerial influence $d_1 = H(c_2, w_1, u)$ on the Grid system, where the control effect $u = Q(r_2, c_1, y)$ designed to improve the quality of decisions made by resource allocation agents by influencing the degree of intent of agents to perform tasks of different classes.

The H and Q bonds have the same nature as the F bond considered. It should be noted that in the event of failure of any MAS agent, including the control agent, the operation of the control object will continue [11].

At the same time, only the quality of his work may decrease.

2. Application-level computing management.

Additional application-level computational management tools are a virtual application community that is created to run a parallel application of a local user program in a Grid system.

The main purpose of the virtual community application - providing a selection of the least loaded CC running a parallel application, monitoring and transmitting to the user the results of calculations. The virtual application community includes a custom agent, a classification and scheduling agent, an agent manager, and a dynamically changing set of local agents [10].

Necessary for the distribution of information about the computational characteristics of the nodes and the current indicators of the volume of computational work CC, presented as a vector c_2 , the agent-manager receives from the managing agent.

The agent manager is also responsible for automatically restarting tasks with new settings and for monitoring the user's task execution process. For distribution of tasks on local agents the tender model where computational works act as lots, and as - representatives of the computing resources applying for performance of works acts.

In general, the service provides the user with the following options: task formulation, configuration and input of data for the program, obtaining calculation results, viewing the current CC load and receiving information messages by both mail and web interface. Along with the listed functions of system character in the created virtual community of application it is possible to consider the possibilities caused by specificity of subject area of application of the user. Local agents are responsible for sending tasks to the local CC

management system, analyzing the current state of the CC and transmitting the results of the tasks to the agent-manager.

Conclusions

The article considers methods and tools for managing problem-oriented [8] distributed computing in a clustered Grid system [9], integrated with traditional meta-planners and local resource managers of Grid nodes, including original methods and tools for converting user-friendly queries in computational tasks, task classification and decomposition of environmental resources according to task classes.

These methods and tools have a number of distinctive features. First, they provide the ability to develop and implement application services in different modes: managing calculations both at the level of individual applications and at the level of task flows; allocation of resources required to perform service operations by special agents or traditional local resource managers, application of static or dynamic computational scheduling.

REFERENCES

1. Foster, I. (2006), "Globus Toolkit Version 4: Software for Service-Oriented Systems", *IFIP Int. Conf. on Network and Parallel Computing*, Springer, pp. 2–13.
2. Rajkumar, Buyya R., Vecchiola, C. & Selvi, S.T. (2013), *Mastering Cloud Computing*, Morgan Kaufmann, Burlington, Massachusetts, USA, 452 p.
3. Binsztok, H., Koprowski, A. & Swarczewskaja, I. (2013), *Opa: Up and Running*, O'Reilly Media, 1st edition, 164 p.
4. Streit, A., Bala, P. & Beck-Ratzka, A. (2010), "UNICORE 6 – Recent and Future Advancements", *Ann. Telecommun.*, No. 65, pp. 757–762.
5. Bukhanovskiy, A.V., Kovalchuk, S.V. and Marjyn, S.V. (2009), "Intelligent high-performance software systems for modeling complex systems: concept, architecture and implementation examples", *Izvestiya vuzov. Instrument.*, Vol. 52, No. 10, pp. 5–24.
6. Astaf'ev, A.S., Afanasjev, A.P. and Lazarev, Y.V. (2009), "Scientific service-oriented environment based on Web technologies and distributed computing. Scientific service on the Internet: scalability, parallelism, efficiency", *Tr. Vseros. Supercomputer*, Publishing House of Moscow State University, Moscow, pp. 463–467.
7. Toporkov, V.V., Emeljanov, D.M. & Toporkova, A.S. (2014), "Metaplanning and resource management in GRID", *ITNOU*, No. 3, pp. 72–80.
8. Feoktistov, A.G. and Kostromin, R.O. (2016), "Development and application of subject-oriented multi-agent systems for distributed computing management", *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, pp. 65–75.
9. Kostromyn, R.O. & Feoktystov, A.Gh. (2017), "Multi-agent control system for distributed computing", *ITNOU*, No. 4. P. 18–22.
10. Amato A. & Venticinque, S. A (2014), "Distributed Agent-Based Decision Support for Cloud Brokering", *Scalable Comput.: Pract. Exp.* Vol. 15, No. 1, pp. 65–78.
11. Bychkov, Y.V. (2016), "Multi-agent control of a computer system based on metamonitoring and simulation", *Autometry*, Vol. 52, No. 2, pp. 3–9.
12. Batool, K. & Niazi, M.A. (2017), "Modeling the internet of things: a hybrid modeling approach using complex networks and agent-based models", *Complex Adaptive Systems Modeling*, Vol. 5, No. 1, pp. 4–21.
13. Budaev, D., Amelin, K., Voschuk, G. (2016), "Realtime task scheduling for multi-agent control system of UAV's group based on network-centric technology", *Int. Conf. on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT2016)*, pp. 378–381.
14. Vyttykh, V.A. & Skobelev, P.O. (2009), "The method of conjugated interactions for managing the distribution of resources in real time", *Autometry*, Vol. 45. No. 2, pp. 84–86.
15. Ghranychn, O.N. & Skobelev, P.O. (2013), "Supercomputers and multi-agent technologies for solving complex problems of real-time resource management", *Supercomputers*, No. 4(16), pp. 54–59.
16. Kuchuk, G.A. & Kovalenko, A.A. (2018), "Methods of synthesis of information and technical structures of critical object management system", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 22–27, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
17. Shostak, Y.V., Sobchak, A.P., Popova, O.Y. & Myshhenko, M.A. (2017), "Synthesis method for a multi-agent web-oriented environment based on information satellites", *Advanced Information Systems*, Vol. 1, No.1, pp. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.1.03>
18. Skulysh, M.A. (2018), "Mathematical model of finding the optimal amount of resources of the virtual service node", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 2. pp. 30–34, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.05>
19. Kasilov, O.V. & Kramsjka, K.I. (2020), "Models and method of synthesis of information retrieval system", *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 2, pp. 94–99, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.14>

Received (Надійшла) 12.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.02.2022

Колумбет Вадим Петрович – аспірант кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Vadim Kolumbet – Phd student of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky KPI”, Kyiv, Ukraine;

e-mail: kvplinux@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0871-9402>.

Свинчук Ольга Василівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Olha Svyinchuk – Candidate of Physic-Mathematical Sciences, Associated Professor, Senior Lecturer of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky KPI”, Kyiv, Ukraine;

e-mail: 7011990@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9032-6335>.

Мультиагентні методи управління розподіленими обчисленнями у гібридних кластерах

В. П. Колумбет, О. В. Свинчук

Анотація. Сучасні інформаційні технології передбачають використання технологій серверних систем, технологій віртуалізації, комунікаційних засобів для розподілених обчислень та розроблення програмно-апаратних рішень центрів обробки та збереження даних, найбільш ефективними з таких комплексів для управління неоднорідними обчислювальними ресурсами є гібридна GRID-розподілена обчислювальна інфраструктура, яка об'єднує ресурси різних типів з колективним доступом до цих ресурсів для і спільного використання загальних ресурсів. У статті розглядається мультиагентна система, що забезпечує інтеграцію підходу до управління обчисленнями для кластерної Grid-системи обчислювального типу, вузли якої мають складну гібридну структуру. Гібридний кластер включає обчислювальні модулі, що підтримують різні технології паралельного програмування і розрізняються своїми обчислювальними характеристиками. Новизна і практична значущість представлених в статті методів і засобів полягають в істотному розширенні функціональних можливостей системи управління обчисленнями кластерної Grid за розподілом і поділу ресурсів Grid на різних рівнях виконання завдань, в наявності можливості вбудовування інтелектуальних засобів управління обчисленнями в проблемно-орієнтовані додатки. Застосування мультиагентних систем для планування задач у Grid системах дасть змогу розв'язати дві основні проблеми – масштабованості та адаптивності. Методи й прийоми, що використовуються сьогодні, не в достатній мірі забезпечують розв'язання цих складних проблем. Таким чином, актуальним є наукове завдання підвищення результативності методів та засобів управління проблемно-орієнтованими розподіленими обчисленнями в кластерній Grid-системі, інтегрованих з традиційними мета-планувальниками і локальними менеджерами ресурсів вузлів Grid-системи, що відповідають тенденціям розвитку концепції масштабованості та адаптивності.

Ключові слова: мультиагентне управління; розподілені обчислення; GRID; кластерні Grid; мультиагентне моделювання; інтелектуальний агент; мультиагентна система; мета-планувальники; імітаційне моделювання.

Мультиагентные методы управления разделенными вычислениями в гибридных кластерах

В. П. Колумбет, О. В. Свинчук

Аннотация. Современные информационные технологии предполагают использование технологий серверных систем, технологий виртуализации, коммуникационных средств для распределенных вычислений и разработки программно-аппаратных решений центров обработки и хранения данных, наиболее эффективными из таких комплексов для управления неоднородными вычислительными ресурсами является гибридная GRID-распределенная вычислительная инфраструктура объединяет ресурсы разных типов с коллективным доступом к этим ресурсам и совместного использования общих ресурсов. В статье рассматривается мультиагентная система, обеспечивающая интеграцию подхода к управлению вычислениями для кластерной Grid системы вычислительного типа, узлы которой имеют сложную гибридную структуру. Гибридный кластер включает в себя вычислительные модули, поддерживающие различные технологии параллельного программирования и различающиеся своими вычислительными характеристиками. Новизна и практическая значимость представленных в статье методов и средств заключаются в существенном расширении функциональных возможностей системы управления вычислениями кластерной Grid по распределению и разделению ресурсов Grid на разных уровнях выполнения задач, налицо возможности встраивания интеллектуальных средств управления вычислениями в проблемно-ориентированные приложения. Применение мультиагентных систем для планирования задач в Grid системах позволит решить две основные проблемы – масштабируемость и адаптивность. Используемые сегодня методы и приемы в недостаточной степени обеспечивают решение этих сложных проблем. Таким образом, актуальна научная задача повышения результативности методов и средств управления проблемно-ориентированными распределенными вычислениями в кластерной Grid-системе, интегрированных с традиционными мета-планировщиками и локальными менеджерами ресурсов узлов Grid-системы, соответствующими тенденциям развития концепции масштабируемости и адаптивности.

Ключевые слова: мультиагентное управление; распределенные вычисления; GRID; кластерные Grid; мультиагентное моделирование; интеллектуальный агент; мультиагентная система; метапланировщики; имитационное моделирование.

Є. І. Калінін¹, Д. О. Лисиця¹, А. С. Нечаусов², Г. Я. Криховецький³¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна² Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна³ Institute of Specialized Communication and Information Security, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky KPI", Kyiv, Ukraine

АСИМПТОТИКА СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ З ДВОМА МАЛИМИ СИНГУЛЯРНО-ЗБУРЮЮЧИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Анотація. Предметом досліджень статті є динамічні системи управління з оптимальними повільними рухами. Метою роботи є отримання асимптотичного наближення управління в формі зворотного зв'язку, яке, не будучи рівномірним за областю визначення системи, формує рівномірно наближені до оптимальних повільні рухи системи. Завдання дослідження полягають у проведенні асимптотичного аналізу регулятора при малих значеннях параметрів. Застосовувані методи: методи мінімізації квадратичних функцій та методи матричної алгебри. Отримані результати: розглянуто задачу оптимального рівняння з двома малими сингулярно збуджуючими параметрами. Введені вимоги на характеристики та керованість обраної системи. Завдання, що розглядається, пов'язане, на відміну від відомих досліджень, з принциповою проблемою: при спрямуванні в нуль параметрів системи певні компоненти матриці, що задовольняє рівнянням Рікатті, в силу граничної умови для неї, набувають особливості в певних проміжках часу. Практична значущість роботи полягає у тому, що з використанням методів мінімізації отримані загальні методи побудови рівномірної області асимптотики систем оптимального управління з двома малими сингулярно-збуджуючими параметрами за іншим малим параметром.

Ключові слова: оптимізація; рівномірна область асимптотики; стохастична динамічна система; простір параметрів, збуджуючі параметри.

Вступ

Завдання оптимального управління в якісному плані досліджені досить повно. Основні проблеми чисельного розв'язання зазначених завдань пов'язані з урахуванням фазових обмежень за наявності власних обмежень на керуючі впливи, і наявності деяких збуджуючих параметрів [1, 2, 5].

В даний час у цій галузі є певний набір чисельних методів різного характеру та ступеня спільності. Як правило, у цих методах ігноруються або вважаються тривіальними зазначені особливості [1, 3, 8, 14]. При розв'язанні завдань з наявністю власних обмежень виділяють методи типу можливих напрямів, які суворо зберігають на кожному кроці ітераційного процесу загальні обмеження як на управління, так і на фазові змінні. При розв'язанні завдань з деякими збуджуючими параметрами основні методи зводяться в наближенні області визначення системи до рівномірних значень.

У разі лінійної керованої системи дослідження завдання зазвичай проводиться у фазовому просторі кінцевих станів і метод розв'язку будується відносно відповідного завдання математичного програмування [4, 6, 7]. Кожне допоміжне завдання методу пов'язане з відшукуванням сідлової точки для білінійної функції на прямому добутку множини досяжності та деякого багатогранника.

Окремо стоять завдання за принципами зворотного зв'язку [9 – 13]. Управління за принципом зворотного зв'язку є головним у теорії керування. Класична теорія регулювання, що базується на детермінованих моделях невисокого порядку, основну увагу приділяла зворотним зв'язкам за станом, що припускає можливість точного вимірювання всіх компонент поточного стану системи.

В сучасній теорії управління, що має справу і з невизначеними системами високого порядку, розглядаються найчастіше зворотні зв'язки за виходом. Вони працюють на інформації, яка постачається доступними недосконалими вимірювальними пристроями (сенсорами). В даний час найбільшого розвитку набула теорія оптимальних лінійних зворотних зв'язків по виходу для лінійно-квадратичних завдань зі стохастичною гаусовою невизначеністю [2]. Для систем з нестохастичною невизначеністю велика кількість робіт останніми роками присвячена побудові лінійних зворотних зв'язків за виходом методами H_∞ -теорії управління [3].

Мета роботи – отримання асимптотичного наближення управління в формі зворотного зв'язку, яке, не будучи рівномірним за областю визначення системи, формує рівномірно наближені до оптимальних повільні рухи системи.

Завдання дослідження полягають у проведенні асимптотичного аналізу регулятора при малих значеннях параметрів.

Формування задачі оптимального керування

Розглянемо задачу оптимального рівняння з двома малими сингулярно збуджуючими параметрами. Необхідно мінімізувати квадратичний функціонал виду:

$$I(u) = \lambda_f^{-1} x' H' F H x \big|_{t=T} + \int_0^T (x' D x + u' R u) dt \quad (1)$$

на траєкторіях системи

$$\begin{aligned} dy / dt &= A_1 x + A_2 y, \quad y|_{t=0} = y^0; \\ \lambda dz / dt &= A_3 x + A_4 y + B_z u, \quad z|_{t=0} = z^0, \end{aligned} \quad (2)$$

заданої на фіксованому відрізку часу $0 \leq t \leq T$, де $\lambda > 0$ і $\lambda_f > 0$ – деякі малі параметри $y \in E^n$; $z \in E^m$; $x = \text{col}[y, z]$; $u \in E'$, а штрих означає транспонування.

Нехай на відрізку $0 \leq t \leq T$ виконуються наступні вимоги:

1. Матриці $D = D(t)$, $R = R(t)$, $A_i = A_i(t)$, $i = \overline{1, 4}$ і $B_z = B_z(t)$ безперервно диференційовані; $D(t)$ та $R(t)$ – позитивно визначені; H – постійна матриця блочного вигляду $H = [H_y 0]$, де H_y – матриця $q \times n$ ($q \leq n$); F – позитивно визначена матриця розміру $q \times q$;

$$D = \begin{bmatrix} D_1 & D_2 \\ D_2 & D_3 \end{bmatrix},$$

де D_1 – блок, розмірність якого складає $n \times n$, D_3 – блок, розмірність якого $m \times m$; $D_3(t) \equiv 0$.

2. Система (2) цілком керована.

3. Усі власні числа матриці $A_4(t)$ лежать у лівій півплощині та:

$$\text{rank}[B_2(t), A_4(t)B_2(t), \dots, A_4^{m-1}(t)B_2(t)] = m.$$

Позначимо:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ \lambda^{-1}A_3 & \lambda^{-1}A_4 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda^{-1}B_2 \end{bmatrix},$$

$$S = BR^{-1}B'.$$

За умов 1 та 2 оптимальне управління має вигляд:

$$u = -R^{-1}B'Px, \quad (3)$$

де $l \times l$ матриця P ($l = n + m$) задовольняє рівняння Ріккати:

$$dP/dt = -PA - A'P + PSP - D;$$

$$P|_{t=T} = \lambda_f^{-1}H'FH.$$

В роботах [3, 4] виконаний асимптотичний аналіз регулятора (3) окремо по кожному з параметрів λ і λ_f , інший параметр вважався при цьому фіксованим, скажімо, рівним одиниці. Матриця H була прийнята одиничною.

Вивчимо асимптотику системи (2), (3) за умови одночасно малих значень λ і λ_f та для прямокутної матриці H , що має разом із матрицями D і B частинний вигляд.

Завдання, що розглядається, пов'язане, проте, на відміну від [3, 4], з принциповою проблемою.

При спрямуванні λ_f в нуль певні компоненти матриці P , в силу граничної умови для неї, набувають особливості при $t = T$.

Загальні методи побудови рівномірної області асимптотики таких систем за іншим малим параметром λ нині відсутні.

Побудуємо вказану асимптотику нульового наближення. Підстановкою в рівняння Ріккати легко переконатися, що:

$$P = K + W'(M + \lambda_f F^{-1})^{-1}W, \quad (4)$$

де матриці K , W і M задовольняють рівнянням виду:

$$dK/dt = -KA - A'K + KSK - D, \quad K|_{t=T} = 0;$$

$$dW/dt = -W(A - SK), \quad W|_{t=T} = H;$$

$$dM/dt = -WSW', \quad M|_{t=T} = 0.$$

За аналогією з роботою [3] можна сказати, що вимога 2 еквівалентна умові $M > 0$ для всіх $0 \leq t \leq T$. Тому матриця $(M + \lambda_f F^{-1})^{-1}$ існує для всіх $0 \leq t < T$, $\lambda_f \geq 0$. Матриці K і W розіб'ємо на

блоки $\begin{bmatrix} K_1 & \lambda K_2 \\ \lambda K_2 & \lambda K_3 \end{bmatrix}$, $W = [W_y, \lambda W_z]$ і перетворимо рівняння для K , W і M до вигляду:

$$\frac{dK_1}{dt} = -K_1A_1 - K_2A_3 - A_1'K_1 - A_3'K_2 + K_2S_2K_2' - D_1;$$

$$\frac{\lambda dK_2}{dt} = -K_1A_2 - K_2A_4 - \lambda A_1'K_2 - A_3'K_3 + K_2S_2K_3 - D_2;$$

$$\frac{\lambda dK_3}{dt} = -K_2'A_2 - K_3A_4 - \lambda A_2'K_2 - A_4'K_3 + K_3S_2K_3 - D_3;$$

$$\frac{dW_y}{dt} = -W_yA_1 - W_zA_{3k}, \quad W_y|_{t=T} = H_y;$$

$$\frac{\lambda dW_z}{dt} = -W_yA_2 - W_zA_{4k}, \quad W_z|_{t=T} = 0;$$

$$\frac{dM}{dt} = -W_zS_zW_z', \quad M|_{t=T} = 0;$$

$$K_1|_{t=T} = 0; \quad K_2|_{t=T} = 0; \quad K_3|_{t=T} = 0,$$

$$\text{де} \quad S_z = B_zR^{-1}B_z'; \quad A_{3k} = A_3 - S_zK_2';$$

$$A_{4k} = A_4 - S_zK_3.$$

Відповідно до роботи [2] у припущеннях 1...3 маємо асимптотичні розкладання:

$$K_1(t, \lambda) = K_{01}(t) + \lambda O_1(t, \lambda);$$

$$K_j(t, \lambda) = K_{0j}(t) + \Pi_0 K_j(\tau) + \lambda O_{kj}(t, \lambda),$$

$$j = 2, 3;$$

$$W_y(t, \lambda) = W_{0y}(t) + \lambda O_{wy}(t, \lambda);$$

$$W_z(t, \lambda) = W_{0z}(t) + \Pi_0 W_z(\tau) + \lambda O_{wz}(t, \lambda);$$

$$M(t, \lambda) = M_0(t) + \lambda O_M(t, \lambda),$$

де $\tau = (t - T)/\lambda$, а величини виду $O(t, \lambda)$ обмежені при $0 \leq t \leq T$, $0 < \lambda \leq \Delta$, $\Delta > 0$ – будь-яке фіксоване число. Головні члени підпорядковуються рівнянням:

$$0 = -K_{01}A_1 - K_{02}A_4 - D_2;$$

$$0 = -W_{0y}A_2 - W_{0z}A_4;$$

$$\begin{aligned}\frac{dK_{01}}{dt} &= -K_{01}A_1 - K_{02}A_3 - A_1'K_{01} - \\ &= A_3'K_{02} + K_{02}S_zK_{02}' - D, \quad K_{01}|_{t=T} = 0; \\ \frac{d\Pi_0K_2}{d\tau} &= -\Pi_0K_2A_4(T), \quad \Pi_0K_2|_{\tau=0} = -K_{02}|_{t=T}; \\ \frac{dW_{0y}}{dt} &= -W_{0y}A_1 - W_{0z}A_{3k}, \quad W_{0y}|_{t=T} = H_y; \\ \frac{d\Pi_0W_z}{d\tau} &= -\Pi_0W_zA_4(T), \quad \Pi_0W_z|_{\tau=0} = -W_{0z}|_{t=T}; \\ \frac{dM_0}{dt} &= -W_{0z}S_zW_{0z}', \quad M_0|_{t=T} = 0, \\ \text{де } A_{3k} &= A_3 - S_2K_{02}'; \text{ при } D_3 \equiv 0 \quad K_{03} = \Pi_0K_3 \equiv 0.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{K}_2 &= K_{02} + \Pi_0K_2 + \Pi_0K_2; \\ \tilde{W}_z &= W_{0z} + \Pi_0W_z; \\ \text{Позначимо } \tilde{K} &= \begin{bmatrix} K_{01} & \lambda\tilde{K}_2 \\ \lambda\tilde{K}_2 & 0 \end{bmatrix}; \\ \tilde{W} &= [W_{0y}\lambda\tilde{W}_z].\end{aligned}$$

Запишемо нову систему з наближеним регулятором виду:

$$\begin{aligned}\frac{d\eta}{dt} &= A_1\eta + A_2\xi, \quad \eta|_{t=0} = y^0; \\ \frac{\lambda d\xi}{dt} &= A_3\eta + A_4\xi + B_z\tilde{u}, \quad \xi|_{t=0} = z^0;\end{aligned}\quad (5)$$

$$\tilde{u} = -R^{-1}B'\tilde{P}\xi; \quad (6)$$

$$\tilde{P} = \tilde{K} + \tilde{W}(M_0 + \lambda_f F^{-1})^{-1}\tilde{W}, \quad (7)$$

де $\eta \in E^n$; $\xi \in E^m$; $\xi = \text{col}[\eta, \zeta]$; зворотна матриця (7) існує для всіх $0 \leq t \leq T$, $\lambda_f > 0$ в силу $F > 0$ та $R > 0$.

Зазначимо, що матриця $\tilde{P}$ не дає рівномірного асимптотичного наближення для матриці P на жодному з проміжків $t_0 \leq t \leq T$ при $\lambda \rightarrow 0$, $\lambda_f \rightarrow 0$, де $0 \leq t_0 \leq T$. Більше того, для будь-якого $\lambda > 0$ і будь-якого досить малого $\lambda_f > 0$ знайдуться такі t (близькі до T) що норма різниці $\|P - \tilde{P}\|$ буде більше будь-якого великого наперед заданого числа.

Сформуємо твердження, що при виконанні умов 1...3 та додаткової вимоги позитивної визначеності матриці $L = H_y A_2 A_4^{-1} B_z R^{-1} \times [H_y A_2 A_4^{-1} B_z]'$ (обчисленої при $t = T$) відхилення траєкторій оптимальної (2) – (4) та наближеної (5) – (7) систем підпорядковуються оцінкам виду:

$$\begin{aligned}\|y(t, \lambda, \lambda_f) - \eta(t, \lambda, \lambda_f)\| &\leq C \left\{ \lambda^\delta \exp\left[\varphi(t-T)/\lambda^\delta\right] + \lambda \right\}; \\ \|z(t, \lambda, \lambda_f) - \xi(t, \lambda, \lambda_f)\| &\leq C \left\{ \exp\left[\varphi(t-T)/\lambda^\delta\right] + \lambda \right\}; \\ \|u(t, \lambda, \lambda_f) - \tilde{u}(t, \lambda, \lambda_f)\| &\leq C \left\{ \exp\left[\varphi(t-T)/\lambda\right] + \lambda \right\};\end{aligned}$$

де $C > 0$ і $\varphi > 0$ – деякі постійні, що не залежать від t , λ і λ_f при $0 \leq t \leq T$; $0 < \lambda \leq \Delta$; $0 < \lambda_f \leq \Delta$; $0 < \delta < 1$ і $\Delta > 0$ – будь-які фіксовані числа.

Наведемо короткий виклад доказу твердження. Нехай

$$\begin{aligned}f &= (M + \lambda_f F^{-1})^{-1}(W_y y + \lambda W_z z), \quad f^0 = f|_{t=0}; \\ \varphi &= (M_0 + \lambda_f F^{-1})^{-1}(W_{0y} \eta + \lambda \tilde{W}_z \xi), \quad \varphi^0 = \varphi|_{t=0}; \\ h &= \lambda^{-1}(M_0 + \lambda_f F^{-1})^{-1}(\varphi - \varphi^0).\end{aligned}$$

Неважко перевірити, що $df/dt \equiv 0$, $f \equiv f^0$ та вивести рівняння:

$$\begin{aligned}\frac{d\Delta y}{dt} &= A_1 \Delta y + A_2 \Delta z, \quad \Delta y|_{t=0} = 0; \\ \frac{\lambda d\Delta z}{dt} &= A_{3k} \Delta y + A_4 \Delta z + A_h h + \lambda O_1, \quad \Delta z|_{t=0} = 0; \\ \frac{\lambda dh}{dt} &= -\Pi_\eta \Delta y - (\Pi \xi + \lambda O \xi) \Delta z - S_h h + \\ &+ \Pi_h + \lambda O_2, \quad h|_{t=0} = 0,\end{aligned}\quad (8)$$

$$\Delta y = y - \eta; \quad \Delta z = z - \xi;$$

$$A_{3k} = A_3 - S_z \tilde{K}_2';$$

$$S_h = \tilde{W}_z A_h;$$

$$A_h = \lambda S_z \tilde{W}_z' \times (M_0 + \lambda_f F^{-1});$$

$$\Pi_\eta = \Pi_0 W_\xi A_{3k} - \tilde{W}_z S_z \Pi_0 K_2;$$

$$\Pi_\xi = \Pi_0 W_z [A_4 - A_4(T)];$$

$$\text{де } O_\xi = (W_{0y} A_1 + W_{0z} A_{3k}) A_2 A_4^{-1} -$$

$$-W_{0y} \frac{d}{dt} (A_2 A_4^{-1});$$

$$\lambda O_1 = -S_z (W_z' f^0 - \tilde{W}_z' \varphi^0) +$$

$$+ A_{3k} - A_{3k} + A_{4k} - A_4;$$

$$O_2 = O_\xi z;$$

$$\Pi_h = \Pi_{\eta y} + \Pi_\xi z + \Pi_w \varphi^0.$$

Маємо, що розв'язок $x = \text{col}[y, z]$ рівнянь (2), (3) обмежений при $0 \leq t \leq T$, $0 < \lambda \leq \Delta$, $0 < \lambda_f \leq \Delta$.

Для доказу достатньо записати для векторів x і $V = Px = \text{col}[a, \lambda b]$, $a \in E^n$, $b \in E^m$ систему диференціальних рівнянь з умовами $y|_{t=0} = y^0$, $z|_{t=0} = z^0$, $a|_{t=0} = a^0(\lambda, \lambda_f)$, $b|_{t=0} = 0$ та застосувати теорему [2]. Тоді згідно з цією роботою на тій же області t , λ і λ_f :

$$\begin{aligned}\| \Pi_{\eta, \zeta, h, w}(t, \lambda, \lambda_f) \| &\leq C \exp(\varphi \tau); \\ \| O_{1,2,\zeta}(t, \lambda, \lambda_f) \| &\leq C.\end{aligned}$$

При $0 \leq t \leq T$, $0 < \lambda \leq \Delta$ справедлива оцінка

$$\| \tilde{W}_z(t, \lambda) \| \leq C \lambda^{-1}(T-t), \quad (9)$$

що встановлюється за допомогою теореми Лангража про середнє значення, яка застосовується до різниці $\tilde{W}_z(t, \lambda) - \tilde{W}_z(T, \lambda)$, враховуючи, що $\tilde{W}_z(t, \lambda) = 0$, а матриця $A_4(t)$ – матриця Гурвіца.

З розкладання у ряд Тейлора $M_0(t) = (T-t)L + (T-t)^2 O(1)$, $t \rightarrow T$ та умов $L > 0$, $R > 0$ легко отримати, що $M_0(t) > 0$ для $0 \leq t < T$, а при $0 \leq t \leq T$, $\lambda_f > 0$:

$$\|(M_0(t) + \lambda_f F^{-1})^{-1}\| \leq C(T-t)^{-1}. \quad (10)$$

На підставі оцінок (9) і (10) знаходимо при $0 \leq t \leq T_h$, $0 < \lambda \leq \Delta$, $0 < \lambda_f \leq \Delta$:

$$\|A_h(t, \lambda, \lambda_f)\| \leq C \min\{1; \lambda(T-t)^{-1}\}; \quad (11)$$

$$\|S_h(t, \lambda, \lambda_f)\| \leq C.$$

Проаналізуємо вагові матриці, які пов'язані із системою (8). Маємо для вагової матриці $G_h(t, \theta, \lambda, \lambda_f)$ третього рівняння (8):

$$\frac{dG_h}{dt} = -\lambda^{-1} S_h G_h; \quad (12)$$

$$G_h|_{t=0} = E_q; \quad 0 \leq \theta \leq t \leq T,$$

де E_q – одинична матриця $q \times q$.

Покажемо, що $\|G_h\| \leq C$ при $0 \leq \theta \leq t \leq T$, $0 < \lambda \leq \Delta$, $0 < \lambda_f \leq \Delta$. Нехай спочатку $0 \leq \theta \leq t \leq T - \lambda$. Рівняння (12) можна переписати в еквівалентній інтегральній формі:

$$G_h(t, \theta, \lambda, \lambda_f) = G_0(t, \theta, \lambda_f) - \int_{\theta}^t G_0(t, p, \lambda_f) \frac{1}{\lambda} \Pi_s(p, \lambda, \lambda_f) dp,$$

де G_0 – розв'язок рівняння

$$\frac{dG_0}{dt} = -\lambda^{-1} S_0 G_0, \quad G_0|_{t=0} = E_q, \quad 0 \leq \theta \leq t \leq T - \lambda;$$

$$\Pi_s = S_h - S_0;$$

$$S_0 = \lambda W_{0z} S_z W_{0z}' (M_0 + \lambda_f F^{-1})^{-1}.$$

Легко переконатися, що

$$G_0 = [M_0(t) + \lambda_f F^{-1}] [M_0(\theta) + \lambda_f F^{-1}]^{-1}.$$

Отже, $\|G_0\|$ обмежена. В силу (9) та (10) $\|\Pi_s(t, \lambda, \lambda_f)\| \leq C \exp(\varphi \tau)$ на виділеній області. Застосовуючи метод послідовних наближень

$$G_h^0 = G_0, G_h^n = G_0 - \int_{\theta}^t G_0 \frac{1}{\lambda} \Pi_s G_h^{n-1} dp, \quad n = 1, 2, \dots, \text{зна-}$$

ходимо, що $\|G_h\| \leq C$ на виділеній області.

На решті області визначення обмеженість $\|G_h\|$ очевидна, оскільки довжина проміжку інтегрування рівняння (12) у цьому разі не перевищує λ ,

$\|\lambda_f^{-1} S_h\| \leq C \lambda^{-1}$, $\|G_h|_{t=0}\| \leq C$. Твердження доведено.

Оцінимо вагову матрицю $\Gamma(t, \theta, \lambda)$ перших двох рівнянь (8). Рівняння для неї має вигляд:

$$\frac{d\Gamma}{dt} = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} \lambda A_1 & \lambda A_2 \\ A_{3\tilde{k}} & A_4 \end{bmatrix} \Gamma, \quad (13)$$

$$\Gamma|_{t=\theta} = E_l; \quad 0 \leq \theta \leq t \leq T,$$

де E_l – одинична матриця $l \times l$. Покажемо, що для блочного представлення $\Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_1 & \Gamma_3 \\ \Gamma_2 & \Gamma_4 \end{bmatrix}$ виконуються оцінки:

$$\|\Gamma_{1,2}\| \leq C; \quad \|\Gamma_3\| \leq C \lambda;$$

$$\|\Gamma_4\| \leq C \{\exp[\varphi(\theta - t) / \lambda] + \lambda\},$$

при $0 \leq \theta \leq t \leq T$, $0 < \lambda \leq \Delta$. Перепишемо рівняння для Γ в інтегральній формі:

$$\Gamma(t, \theta, \lambda) = G(t, \theta, \lambda) + \frac{1}{\lambda} \int_{\theta}^t G(t, p, \lambda) \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \Pi_3(p) & 0 \end{bmatrix} \Gamma(p, \theta, \lambda) dp, \quad (14)$$

де $G = \begin{bmatrix} G_1 & G_3 \\ G_2 & G_4 \end{bmatrix}$ – блокова матриця, що задовольняє рівняння виду (13), в якому $A_{3\tilde{k}}$ замінена на $A_{3\bar{k}}$; $\Pi_3 = A_{3\tilde{k}} - A_{3\bar{k}}$.

На підставі теореми з роботи [2] маємо:

$$\|G_{1,2}\| \leq C; \quad \|G_3\| \leq C \lambda;$$

$$\|G_4\| \leq C \exp[\varphi(\theta - t) / \lambda],$$

при $0 \leq \theta \leq t \leq T$, $0 < \lambda \leq \Delta$. Застосовуючи далі метод послідовних наближень до рівняння (14), неважко встановити приведені оцінки для Γ_i , $i = \overline{1, 4}$.

Спираючись на отримані оцінки, аналогічно можна проаналізувати поведінку вагової матриці всієї системи (8) $G_{\Delta}(t, \theta, \lambda, \lambda_f)$, яка задовольняє рівнянню при $0 \leq \theta \leq t \leq T$:

$$\frac{dG_{\Delta}}{dt} = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} \lambda A_1 & \lambda A_2 & 0 \\ A_{3\tilde{k}} & A_4 & A_h \\ -\Pi_{\eta} & -\Pi_{\xi} & -S_h \end{bmatrix} G_{\Delta}, \quad G_{\Delta}|_{t=\theta} = E_{n+m+q},$$

де E_{n+m+q} – одинична матриця розміром $(n+m+q)$, з урахуванням, що стовпці матриці G_{Δ} з номерами від $n+1$ до $n+m+q$ обмежені при $0 \leq \theta \leq t \leq T$, $0 < \lambda \leq \Delta$, $0 < \lambda_f \leq \Delta$.

Висновки

Перейдемо до аналізу розв'язків системи (8). Використовуючи оцінки для G_{Δ} легко довести спочатку обмеженість величин Δu , Δz і h на області $0 \leq t \leq T$, $0 < \lambda \leq \Delta$, $0 < \lambda_f \leq \Delta$.

Для цього достатньо записати (8) у формі:

$$\begin{aligned} & \text{col} \mid \Delta y(t, \lambda, \lambda_f), \Delta z(t, \lambda, \lambda_f), h(t, \lambda, \lambda_f) \mid = \\ & = \int_0^t G \Delta(t, \theta, \lambda, \lambda_f) \cdot \text{col} \mid 0, O_1(\theta), -O_2(\theta) \Delta z(\theta, \lambda, \lambda_f) + \\ & \quad + \lambda^{-1} P_h(\theta) + O_2(\theta) \mid d\theta \end{aligned}$$

і застосувати спосіб послідовних наближень.

Для отримання остаточних оцінок Δy , Δz і Δu скористаємося першими двома рівняннями (8), записавши їх у формі:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta y(t, \lambda, \lambda_f) \\ \Delta z(t, \lambda, \lambda_f) \end{bmatrix} &= \frac{1}{\lambda} \int_0^t \begin{bmatrix} \Gamma_1(t, \theta, \lambda_f) & \Gamma_3(t, \theta, \lambda_f) \\ \Gamma_2(t, \theta, \lambda_f) & \Gamma_4(t, \theta, \lambda_f) \end{bmatrix} \times \\ &\times \begin{bmatrix} 0 \\ A_h(\theta) h(\theta, \lambda, \lambda_f) + \lambda O_1(\theta) \end{bmatrix} d\theta. \end{aligned}$$

Нехай $0 < \delta < 1$ – будь-яке фіксоване число. Тоді за допомогою (11) легко знайти при $0 \leq t \leq T$, $0 < \lambda \leq \Delta$, $0 < \lambda_f \leq \Delta$:

$$\|\Delta y\| \leq C \left[\lambda + \int_0^{T-\lambda^\delta} \|A_h\| d\theta + \int_{T-\lambda^\delta}^T \|A_h\| d\theta \right] \leq C \lambda^\delta.$$

Очевидно також, що $\|\Delta y\| \leq C \lambda$ для $0 \leq t \leq t_0$, $0 < \lambda \leq \Delta$, $0 < \lambda_f \leq \Delta$, де $t_0 < T$.

Підсумовуючи ці оцінки, переконаємось у справедливості твердження щодо величини Δy .

Аналогічно отримуємо оцінки для Δz і, використовуючи (3), (6), (9) та (10), для Δu . Твердження доведено. Зауважимо, що справедливості твердження збережеться, якщо умову $D_3 \equiv 0$ замінити умовою $D_3 = \lambda d_3(t)$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Dorf R.C. and Bishop R.H. (2011) *Modern control system*, 12th Edition, Prentice Hall
2. Denisova L.A. and Meshcheryakov V.A. (2015) "Automatic parametric synthesis of a control system using the genetic algorithm", *Automation and Remote Control*, 76(1), pp. 149-156, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0005117915010142>
3. Denisova L.A. and Meshcheryakov V.A. (2016) "Synthesis of a control system using the genetic algorithms", *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), pp. 156-161, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.567>
4. Макаров И.М., Лохин В.М. (2001) *Интеллектуальные системы автоматического управления*. Физматлит
5. Xue D. and Chen Y.Q. (2013) *System simulation techniques with MATLAB and Simulink*, Chichester: UK, John Wiley & Sons.
6. Purohit G.N., Sherry A.M. and Saraswat M. (2013) "Optimization of function by using a new MATLAB based genetic algorithm procedure", *International Journal of Computer Applications*, 61(15), pp. 1-5.
7. Deb K. (2001) *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, Chichester: UK, John Wiley & Sons.
8. Goldberg D.E. (1994) *Genetic Learning in optimization, search and machine learning*. Addison Wesley.
9. Deb K., Pratap A., Agarwal S. and Meyarivan T. (2002) "A Fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II", *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), pp. 182-197, DOI: <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
10. Jadaan O., Rao C.R., Rajamani L. (2008) "Non-dominated ranked genetic algorithm for solving multi-objective optimization problem: NRGa", *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, pp. 60-67
11. Van Veldhuizen D.A. & Lamont G.B. (2000). "Multiobjective optimization with messy genetic algorithms", *In Proceedings of the 2000 Symposium on Applied Computing*, pp. 470-476, DOI: <https://doi.org/10.1145/335603.335914>
12. Sirinaovakul B. & Thajchayapong, P. (1994). "A knowledge base to assist a heuristic search approach to facility layout", *International Journal of Production Research*, 32, pp. 141-160, DOI: <https://doi.org/10.1080/00207549408956921>
13. Ye M. & Zhou G. (2007). "A local genetic approach to multiobjective, facility layout problems with fixed aisles", *International Journal of Production Research*, 45, pp. 5243-5264, DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540600818179>
14. Scholz D., Jaehn F., & Junker A. (2010). "Extensions to STaTS for practical applications of the facility layout problem", *European Journal of Operational Research*, 204, pp. 463-472, DOI: <http://doi.org/10.1016%2Fj.ejor.2009.11.012>

REFERENCES

1. Dorf R.C. and Bishop R.H. (2011) *Modern control system*, 12th Edition, Prentice Hall
2. Denisova L.A. and Meshcheryakov V.A. (2015) "Automatic parametric synthesis of a control system using the genetic algorithm", *Automation and Remote Control*, 76(1), pp. 149-156, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0005117915010142>
3. Denisova L.A. and Meshcheryakov V.A. (2016) "Synthesis of a control system using the genetic algorithms", *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), pp. 156-161, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.567>
4. Makarov I.M. and Lohin V.M. (2001) *Intelligent automatic control systems*. Fizmatlit
5. Xue D. and Chen Y.Q. (2013) *System simulation techniques with MATLAB and Simulink*, Chichester: UK, John Wiley & Sons.
6. Purohit G.N., Sherry A.M. and Saraswat M. (2013) "Optimization of function by using a new MATLAB based genetic algorithm procedure", *International Journal of Computer Applications*, 61(15), pp. 1-5.
7. Deb K. (2001) *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, Chichester: UK, John Wiley & Sons.
8. Goldberg D.E. (1994) *Genetic Learning in optimization, search and machine learning*. Addison Wesley.
9. Deb K., Pratap A., Agarwal S. and Meyarivan T. (2002) "A Fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II", *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), pp. 182-197, DOI: <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
10. Jadaan O., Rao C.R., Rajamani L. (2008) "Non-dominated ranked genetic algorithm for solving multi-objective optimization problem: NRGa", *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, pp. 60-67
11. Van Veldhuizen D.A. & Lamont G.B. (2000). "Multiobjective optimization with messy genetic algorithms", *In Proceedings of the 2000 Symposium on Applied Computing*, pp. 470-476, DOI: <https://doi.org/10.1145/335603.335914>

12. Sirinaovakul B. & Thajchayapong, P. (1994). "A knowledge base to assist a heuristic search approach to facility layout", *International Journal of Production Research*, 32, pp. 141-160, DOI: <https://doi.org/10.1080/00207549408956921>
13. Ye M. & Zhou G. (2007). "A local genetic approach to multiobjective, facility layout problems with fixed aisles", *International Journal of Production Research*, 45, pp. 5243-5264, DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540600818179>
14. Scholz D., Jaehn F., & Junker A. (2010). "Extensions to STaTS for practical applications of the facility layout problem", *European Journal of Operational Research*, 204, pp. 463-472, DOI: <http://doi.org/10.1016%2Fj.ejor.2009.11.012>

Received (Надійшла) 26.10.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.01.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Калінін Євген Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Харківський національний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Yevhen Kalinin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: kalinin.kpi.kharkov.ua@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6191-8446>.

Лисиця Дмитро Олександрович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Dmytro Lysytsia – Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: lysytia-mail@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1778-4676>.

Нечаусов Артем Сергійович – кандидат технічних наук, доцент геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна;

Artem Nechausov – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Geoinformation Technologies and Space Monitoring of the Earth, National Aerospace University named after M.Y. Zhukovsky "KhAI", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: a.nechausov@khail.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7216-5566>.

Криховецький Георгій Яремович – кандидат технічних наук, ст. наук. співр., завідувач кафедри, Інститут спеціального зв'язу 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>.

Асимптотика системы оптимального управления с двумя малыми сингулярно-возбуждающими параметрами

Е. И. Калинин, Д. А. Лисица, А. С. Нечаусов, Г. Я. Криховецкий

Аннотация. Предметом исследований статьи являются динамические системы управления с оптимальными медленными движениями. Целью работы является получение асимптотического приближения управления в форме обратной связи, которое, не являясь равномерным по области определения системы, формирует равномерно приближенные к оптимальным медленные движения системы. Задачи исследования заключаются в проведении асимптотического анализа регулятора при малых значениях параметров. **Применяемые методы:** методы минимизации квадратичных функций и методы матричной алгебры. **Полученные результаты:** рассмотрена задача оптимального уравнения с двумя малыми сингулярно возбуждающими параметрами. Введены требования на характеристики и управляемость выбранной системы. Рассматриваемая задача связана, в отличие от известных исследований, с принципиальной проблемой: при стремлении к нулю параметров системы определенные компоненты матрицы, удовлетворяющей уравнению Рикатти, в силу предельного условия для нее, приобретают особенности в определенных промежутках времени. **Практическая значимость работы** состоит в том, что с использованием методов минимизации получены общие методы построения равномерной области асимптотики систем оптимального управления с двумя малыми сингулярно-возбуждающими параметрами по другому малому параметру.

Ключевые слова: оптимизация; равномерная область асимптотики; стохастическая динамическая система; пространство параметров, возмущающие параметры.

Asymptotic behavior of an optimal control system with two small singularly excitatory parameters

Yevhen Kalinin, Dmytro Lysytsia, Artem Nechausov, Heorhii Krykhovetskyi

Annotation. The subject of research in the article is dynamic control systems with optimal slow motions. The goal of the work is to obtain an asymptotic approximation of the control in the form of feedback, which, not being uniform in the domain of the system definition, forms slow motions of the system uniformly close to optimal ones. The objectives of the study are to conduct an asymptotic analysis of the controller for small values of the parameters. **Applied methods:** methods of minimization of quadratic functions and methods of matrix algebra. **The obtained results:** the problem of the optimal equation with two small singularly exciting parameters is considered. Requirements for the characteristics and controllability of the selected system have been introduced. The problem under consideration, in contrast to well-known studies, is connected with a fundamental problem: as the system parameters tend to zero, certain components of the matrix that satisfies the Riccati equation, due to the limiting condition for it, acquire singularities in certain time intervals. **The practical significance of the work** lies in the fact that with the use of minimization methods, general methods are obtained for constructing a uniform region of asymptotics for optimal control systems with two small singular-exciting parameters with respect to another small parameter.

Keywords: optimization; uniform region of asymptotics; stochastic dynamic system; parameter space, perturbing parameters.

Methods of information systems synthesis

УДК 681.142

DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.1.07>

Victor Krasnobayev, Sergey Koshman, Dmytro Kovalchuk

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

THE CONCEPT OF PERFORMING THE ADDITION OPERATION IN THE SYSTEM OF RESIDUAL CLASSES

Abstract. The **subject** of the article is the development of a method for implementing the arithmetic operation of adding the residuals of numbers, which are represented in the system of residual classes (RNS). This method is based on the use of positional binary adders. The **purpose** of the article is to improve the performance of computer systems (CS) and their components by introducing new ways of organizing calculations based on the use of RNS. **Tasks:** to analyze and identify the shortcomings of the existing number systems that are used in the construction of computer systems and components; explore possible ways to eliminate the identified deficiencies; explore the structure of binary positional adders, taking into account the scheme for adding two residues of numbers modulo RNS; to develop a method for constructing adders modulo RNS, which is based on the use of a set of binary single-digit positional adders. **Research methods:** methods of analysis and synthesis of computer systems, number theory, coding theory in RNS. The following **results** are obtained. The paper shows that one of the promising ways to improve the performance of the CS is the use of RNS. The mathematical basis of RNS is the Chinese remainder theorem, which states that an integer operation on one large modulus can be replaced by a set of operations on coprime small modules. This opens up broad prospects for optimizing calculations. On the one hand, it is possible to significantly simplify the performance of complex and cumbersome calculations, including on low-resource computing platforms. On the other hand, calculations for different modules can be performed in parallel, which increases the performance of the CS. **Conclusions.** The article considers the operation of adding two numbers. This operation is the basis for both traditional positional number systems and RNS, i.e. forms the computational basis of all existing CS components. A new method for calculating the sum of the residuals of numbers modulo an arbitrary is proposed, and examples are given that clearly demonstrate the effectiveness of the proposed method. This method can be used in various computer applications, including for improving computing performance, ensuring fault tolerance, etc.

Keywords: number system; residue number system; non-positional code structure; operation of adding; positional binary adder.

Introduction

One of the components of a computer system (CS) in the positional binary number system (PNS) is an adder of two numbers [1–3]. In particular, the components of the CS are also adders modulo m_i of two numbers. This type of modulo adders is widely used both in the PNS and in the non-positional number system in the residual classes (RNS) [4, 5]. So, the adder of numbers in the RNS will consist of a set of k $n = [\log_2(m_i - 1) + 1]$ -bit adders modulo m_i ($i = \overline{1, k}$).

In this aspect, an urgent scientific and technical problem is the problem of constructing adders operating according to an arbitrary modulus m_i of the RNS.

If the residues a_i and b_i of numbers A and B in the RNS are represented in a binary PNS, then the adder of two residues a_i and b_i modulo m_i is a sequential collection of n binary one-bit adders.

The purpose of the article is improving the performance of computing systems and components through the introduction of new ways of organizing calculations based on the use of RNS. This is done by developing a method for performing the operation of modular addition $(a_i + b_i) \bmod m_i$ of two residues of numbers modulo m_i arbitrary, based on the use of a binary adder modulo $M = 2^n - 1$. The article provides examples of concrete execution of the method for performing the modular addition operation for various

values of the residues a_i and b_i . The analysis of the considered examples showed the practical applicability of the method proposed in the article for performing the operation of modular addition $(a_i + b_i) \bmod m_i$ of two residues of the numbers A and B modulo m_i . The method proposed in the article for performing the operation of modular addition of two residues can be used both in the PNS and in the RNS.

Related work

The main theoretical provisions of the number system in the residual classes were laid in works [6, 7], as well as in [8–11] and many others [4, 5]. Computational algorithms for integer operations in RNS were substantiated on the basis of mathematical methods of number theory and the fundamental Chinese remainder theorem [12]. In subsequent works, various applied issues were investigated. In particular, mathematical models of integer operations in RNS are investigated in [13]. Papers [8] and [9] are devoted to error control in RNS. Improving the reliability and fault tolerance of computer systems was studied in [10, 12] and also in [14]. The construction of fault-tolerant computing architectures, including those based on FPGAs, is studied in [15]. In [10], the computational aspects of integer arithmetic are investigated as applied to cryptography problems. In works [16], new directions are investigated related to the computational processes of artificial neural networks and intelligent computing.

It is known that the central, basis of the operation performed by a computer system (CS) in a positional binary number system (PNS) is the operation of adding two numbers.

In a non-positional number system in residual classes (RNS), the main operation is the operation of adding $(a_i + b_i) \bmod m_i$ the residues a_i and b_i of numbers A and B according to a given modulus m_i .

In this case, the adder of numbers in the RNS will consist of a set of k $n = [\log_2(m_i - 1) + 1]$ - bit adders modulo m_i ($i = \overline{1, k}$). Modular binary adders have a fixed modulus $M = 2^n - 1$, $M = 2^n$ or $M = 2^n + 1$.

This circumstance, in the general case, does not allow their direct use as modules m_i of RNS.

If the modulus m_i of the adder of residues a_i and b_i of numbers A and B differs from the value of M by a small amount, then the implementation of the modular addition operation can be relatively simple.

In the PNS, the most widespread are two options for the implementation of the operation of modular addition [16]. For each option, the following modulus ratios take place.

First variant. There is a ratio of modules $M = m_i + 1$. For the second variant, the ratio of modules takes place $M = m_i - 1$. For the variants considered, the implementation of the modular addition of residuals is quite simple. At the same time, in the general case of choosing the RNS modulus m_i , the operation of modular addition of two residues is a rather laborious task. In this aspect, an important problem arises of constructing adders for an arbitrary RNS modulus.

Method for performing the addition operation in the residual class system

The existing [16] method of adding $(a_i + b_i) \bmod m_i$ the residues of a_i and b_i numbers modulo m_i , based on the use of binary adders, consists of a combination of the following actions.

– *First action.* The structure of the adder modulo m_i is determined.

– *Second action.* The operation of bitwise addition modulo two residues a_i and b_i is performed.

– *Third action.* The result $S_n S_{n-1} \dots S_2 S_1$ of the operation of bitwise addition modulo two residues a_i and b_i is placed in the corresponding binary one-bit adders (OBA) of the adder structure modulo m_i RNS.

– *Fourth action.* Based on the modular addition scheme, an algorithm for adding two residues a_i and b_i of numbers modulo m_i RNS is implemented.

The presented method has limited application. So, in the case of equality of two residues a_i and b_i , the result of modular addition will not always be accurate. This is due to the fact that the result

$S_n S_{n-1} \dots S_2 S_1$, does not always take into account the relationship between the values of the values of the modules m_i , M and the value of the sum $a_i + b_i$ of positional addition.

When developing a new method for adding the residues a_i and b_i it is necessary to take into account the options for the relationship between the values of the modules m_i , M and the value $a_i + b_i$ of the result of positional addition of the residues of numbers.

Consider a new method for adding the residues of a_i and b_i numbers modulo m_i .

A new method for implementing the addition operation from a combination of the following actions.

– *First action.* For the value of the modulus m_i , the synthesis of the adder modulo m_i is performed.

– *Second action.* The result of summation $a_i + b_i$ is determined.

– *Third action.* The result of the positional comparison of the result $a_i + b_i$ of addition and the value of the modulus of the adder m_i is determined.

– *Fourth action.* If the condition $a_i + b_i \leq m_i$, is fulfilled, the result of the operation is the value of the sum $a_i + b_i$.

– *Fifth action.* When the condition $a_i + b_i > m_i$ is satisfied, the result $a_i + b_i$ of positional adding is bitwise entered into the corresponding $n = [\log_2(m_i - 1) + 1]$ bits of the OBA.

– *Sixth action.* In accordance with the algorithm for adding two residues a_i and b_i of numbers modulo, the operation of adding two residues a_i and b_i of numbers modulo is implemented.

Results of implementation of the method for performing the addition operation in the residual class system

Let's give examples of the implementation of the modular addition operation by the new method. We will consider examples of the implementation of the modular addition operation in two modes. First mode $a_i + b_i \leq m_i$ and second mode $(a + b) > m_i$. Let $m_i = 11$.

Example 1. Residues are $a_i = 5$ and $b_i = 4$. The adder implements the operation of positional addition of the residues $a_i = 0101$ and $b_i = 0100$ in the form

$$a_i + b_i = 1001.$$

The value of the sum $a_i + b_i = 1001$ determines the result of the operation.

$$\text{Check: } (0101 + 0100) = 1001(\bmod 11).$$

Example 2. Let $a_i = 5$ and $b_i = 6$. The adder implements the operation of positional addition of the residues $a_i = 0101$ and $b_i = 0110$ in the form

$$a_i + b_i = 1011.$$

The value of the positional sum $a_i + b_i = 1011$ of the residues $a_i = 0101$ and $b_i = 0110$ is bitwise fed to the corresponding inputs of the OBA $5_4 - 5_1$. Thus, OBA $5_4 - 5_1$ of the adder contain respectively the values 1011. The modular addition operation is implemented according to the modular addition scheme modulo $m_i = 11$ [16]. The algorithm for implementing a modular operation is presented in Table 1 and in Fig. 1. The unit of the binary digit is supplied to the input OBA 5_3 and 5_1 . Fig. 1 shows a scheme of the addition of residues $a_i = 0101$ and $b_i = 0110$ modulo $m_i = 11$.

Check: $(0101 + 0110) = 0000(\text{mod}11)$.

Table 1 – Algorithm for executing the result of the operation for $a_i = 5$ and $b_i = 6$

OBA $5_4 - 5_1$	OBA content $5_4 - 5_1$	The presence of a unit at the DOS inputs $5_4 - 5_1$	The result of the modular addition operation
5_1	1	+1	0
5_2	1	–	0
5_3	0	+1	0
5_4	1	–	0

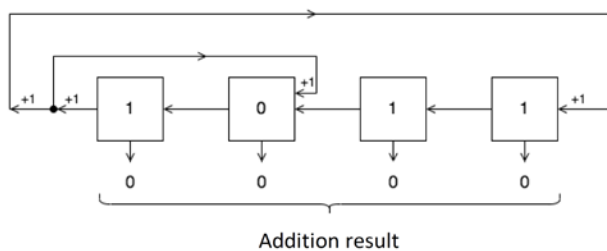


Fig. 1. Scheme for adding residues $a_i = 0101$ and $b_i = 0110$ modulo $m_i = 11$

Example 3. Let $a_i = 5$ and $b_i = 7$. The adder implements the operation of positional addition of the residues $a_i = 0101$ and $b_i = 0111$ in the form $a_i + b_i = 1100$.

The value of the positional sum $a_i + b_i = 1100$ of the residues $a_i = 0101$ and $b_i = 0111$ is bitwise fed to the corresponding inputs of the OBA $5_4 - 5_1$. Thus, OBA $5_4 - 5_1$ of the adder contain respectively the values 1100. The modular addition operation is implemented according to the modular addition scheme modulo $m_i = 11$.

The algorithm for implementing a modular operation is presented in Table 2 and in Fig. 2. The unit of the binary digit is supplied to the input OBA 5_3 and 5_1 .

Check: $(0101 + 0111) = 0001(\text{mod}11)$.

Example 4. Let $a_i = 5$ and $b_i = 9$. The adder implements the operation of positional addition of the residues $a_i = 0101$ and $b_i = 1001$ in the form

$a_i + b_i = 1110$. The value of the positional sum $a_i + b_i = 1110$ of the residues $a_i = 0101$ and $b_i = 1001$ is bitwise fed to the corresponding inputs of the OBA $5_4 - 5_1$. Thus, OBA $5_4 - 5_1$ of the adder contain respectively the values 1110. The algorithm for implementing a modular operation is presented in Table 3 and in Fig. 3. The unit of the binary digit is supplied to the input OBA 5_3 and 5_1 .

Check: $(0101 + 1001) = 0011(\text{mod}11)$.

Table 2 – Algorithm for executing the result of the operation for $a_i = 5$ and $b_i = 7$

OBA $5_4 - 5_1$	OBA content $5_4 - 5_1$	The presence of a unit at the OBA inputs $5_4 - 5_1$	The result of the modular addition operation
5_1	0	+1	1
5_2	0	–	0
5_3	1	+1	0
5_4	1	–	0

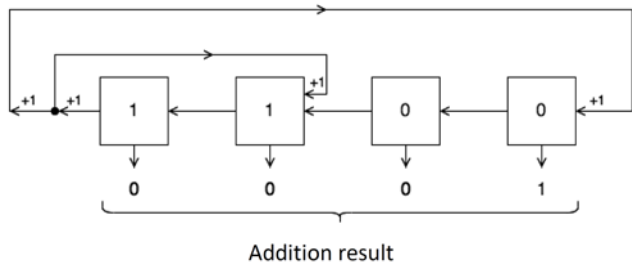


Fig. 2. Scheme for adding residues $a_i = 0101$ and $b_i = 0111$ modulo $m_i = 11$

Table 3 – Algorithm for executing the result of the operation for $a_i = 5$ and $b_i = 9$

OBA $5_4 - 5_1$	OBA content $5_4 - 5_1$	The presence of a unit at the OBA inputs $5_4 - 5_1$	The result of the modular addition operation
5_1	0	+1	1
5_2	1	–	1
5_3	1	+1	0
5_4	1	–	0

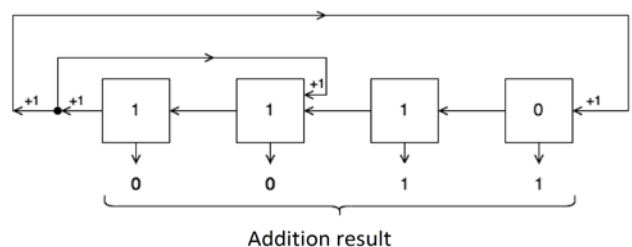


Fig. 3. Scheme for adding residues $a_i = 0101$ and $b_i = 1010$ modulo $m_i = 11$

Conclusion

The number system in the residual classes is a promising direction for the qualitative improvement of

modern computer systems. In particular, the execution of integer computational operations can be significantly accelerated by reducing the bit depth of the computations.

Performing operations on a large module can be replaced by several operations on small modules. And this is at the heart of the computational operations in RNS. We have considered the simplest operations of addition of the remainders modulo an arbitrary. These calculations are used both in the traditional positional number system and in the number system in residual classes.

The article describes a new method for performing the addition operation $(a_i + b_i) \bmod m_i$ of two residues a_i and b_i of numbers modulo.

The addition operation $(a_i + b_i) \bmod m_i$ is implemented based on the use of the structure of

a binary adder modulo m_i of RNS, and also taking into account the scheme for adding two residues a_i and b_i of numbers.

The method for constructing binary adders modulo m_i is based on the structure of an adder modulo $M = 2^n - 1$, which consists of a set of sequential binary one-bit adders.

Examples of executing the method of performing the addition operation for various values of the residues a_i and b_i are given.

The analysis of the considered examples showed the practical applicability of the method proposed in the article for performing the modular addition operation.

The proposed method can be used in various computer applications, including for improving computing performance, providing fault tolerance, etc.

REFERENCES

1. R.S. Alford, "Computer Systems Engineering Management", CRC Press, 2018. <https://doi.org/10.1201/9781351070829>.
2. P.V. Ananda Mohan, "Residue Number Systems", Springer International Publishing, Cham, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-41385-3>.
3. P.V. Mohan, CDAC, Bangalore, "Implementation of Residue Number System Based Digital Filters", A Quarterly Publication of ACCS, (n.d.). <https://journal.accsindia.org/implementation-of-residue-number-system-based-digital-filters/> (accessed August 16, 2020).
4. J.O. Tuazon, "Residue number system in computer arithmetic", Doctor of Philosophy, Iowa State University, Digital Repository, 1969. <https://doi.org/10.31274/rtd-180816-2270>.
5. F. Barsi, P. Maestrini, "Error Correcting Properties of Redundant Residue Number Systems", IEEE Transactions on Computers. (1973) 307–315. <https://doi.org/10.1109/T-C.1973.223711>.
6. M.G. Arnold, "The residue logarithmic number system: theory and implementation", in: 17th IEEE Symposium on Computer Arithmetic (ARITH'05), 2005: pp. 196–205. <https://doi.org/10.1109/ARITH.2005.44>.
7. M.Z. Garaev, A.A. Karatsuba, "The representation of residue classes by products of small integers", Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society. 50 (2007) 363–375. <https://doi.org/10.1017/S0013091505000969>.
8. S. Timarchi, K. Navi, "Efficient Class of Redundant Residue Number System", in: 2007 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, 2007: pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/WISP.2007.4447506>.
9. P.V. Ananda Mohan, "Error Detection, Correction and Fault Tolerance in RNS-Based Designs", in: P.V. A. Mohan (Ed.), Residue Number Systems: Theory and Applications, Springer International Publishing, Cham, 2016: pp. 163–175. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41385-3_7.
10. V.M. Amerbaev, R.A. Solovyev, A.L. Stempkovskiy, D.V. Telpukhov, "Efficient calculation of cyclic convolution by means of fast Fourier transform in a finite field", in: Proceedings of IEEE East-West Design Test Symposium (EWDTS 2014), 2014: pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2014.7027043>.
11. T.-C. Huang, "Self-Checking Residue Number System for Low-Power Reliable Neural Network", in: 2019 IEEE 28th Asian Test Symposium (ATS), 2019: pp. 37–375. <https://doi.org/10.1109/ATS47505.2019.000-3>.
12. V. Krasnobayev, A. Kuznetsov, A. Yanko, K. Kuznetsova, "Correction Codes in the System of Residual Classes", in: 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC&ST), 2019: pp. 488–492. <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061253>.
13. D.I. Popov, A.V. Gapochkin, "Development of Algorithm for Control and Correction of Errors of Digital Signals, Represented in System of Residual Classes", in: 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2018: pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501826>.
14. P.V. Ananda Mohan, "Specialized Residue Number Systems", in: P.V.A. Mohan (Ed.), Residue Number Systems: Theory and Applications, Springer International Publishing, Cham, 2016: pp. 177–193. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41385-3_8.
15. M. Karpinski, S. Ivasiev, I. Yakymenko, M. Kasianchuk, T. Gancarczyk, "Advanced method of factorization of multi-bit numbers based on Fermat's theorem in the system of residual classes", in: 2016 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 2016: pp. 1484–1486. <https://doi.org/10.1109/ICCAS.2016.7832500>.
16. V. Krasnobayev, A. Kuznetsov, V. Babenko, M. Denysenko, M. Zub, V. Hryhorenko, "The Method of Raising Numbers, Represented in the System of Residual Classes to an Arbitrary Power of a Natural Number", in: 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2019: pp. 1133–1138. <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879793>.

Received (Надійшла) 14.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.02.2022

Краснобаев Віктор Анатолійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електроніки і управляючих систем, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна;

Victor Krasnobayev – Doctor of Technical Sciences, professor, Professor of Electronics and Control Systems Department, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: v.a.krasnobayev@karazin.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5192-9918>.

Кошман Сергій Олександрович – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри безпеки інформаційних систем і технологій, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна;

Sergey Koshman – Doctor of Technical Sciences, professor, asc. professor, Professor of Information Systems and Technologies Security Department, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: s.koshman@karazin.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8934-2274>.

Ковальчук Дмитро Миколайович – аспірант кафедри безпеки інформаційних систем і технологій, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна;

Dmytro Kovalchuk – PhD student of Information Systems and Technologies Security Department, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

e-mail: kovalchuk.d.n@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8229-836X>.

Концепція виконання операції додавання у системі залишкових класів

В. А. Краснобаєв, С. О. Кошман, Д. М. Ковальчук

Анотація. Предметом статті є розробка методу реалізації арифметичної операції додавання залишків чисел, що представлені у системі залишкових класів (СЗК). Цей метод заснований на використанні позиційних двійкових суматорів. Метою статті є підвищення продуктивності комп'ютерних систем (КС) та їх компонентів за рахунок застосування нових методів організації обчислень, які засновані на використанні СЗК. **Задачі:** провести аналіз та виявити недоліки існуючих систем числення, що використовуються при побудові комп'ютерних систем та компонентів; дослідити можливі шляхи усунення виявлених недоліків; дослідити структуру двійкових позиційних суматорів з урахуванням схеми додавання двох залишків чисел за модулем СЗК; розробити метод побудови суматорів за модулем СЗК, який заснований на використанні набору двійкових однорозрядних позиційних суматорів. **Методи дослідження:** методи аналізу та синтезу комп'ютерних систем, теорія чисел, теорія кодування у СЗК. Отримано наступні **результати.** У роботі показано, що одним із перспективних напрямів підвищення продуктивності КС є застосування СЗК. Математичною основою СЗК є китайська теорема про залишки, яка стверджує, що цілочислова операція за одним великим модулем може бути замінена набором операцій за взаємно простими малими модулями. Це відкриває широкі перспективи оптимізації обчислень. З одного боку, можна спростити виконання складних і громіздких обчислень, у тому числі на малоресурсних обчислювальних платформах. З іншого боку, обчислення за різними модулями можуть виконуватись паралельно, що підвищує продуктивність КС. **Висновки.** У статті розглянуто операцію додавання двох чисел. Ця операція є основою як для традиційних позиційних систем числення, так і для СЗК, тобто складає обчислювальну основу всіх компонентів КС. Запропоновано новий метод обчислення суми залишків чисел за довільним модулем і наведено приклади, що наочно демонструють ефективність запропонованого методу. Цей метод можна використовувати у різних комп'ютерних додатках, зокрема для підвищення продуктивності обчислень, забезпечення відмовостійкості та інш.

Ключові слова: система числення; система залишкових класів; непозиційна кодова структура; операція додавання; позиційний двійковий суматор.

Концепция выполнения операции сложения в системе остаточных классов

В. А. Краснобаев, С. А. Кошман, Д. Н. Ковальчук

Аннотация. Предметом статьи является разработка метода реализации арифметической операции сложения остатков чисел, которые представлены в системе остаточных классов (СОК). Данный метод основан на использовании позиционных двоичных сумматоров. **Целью** статьи является повышение производительности компьютерных систем (КС) и их компонентов за счёт внедрения новых способов организации вычислений, основанных на использовании СОК. **Задачи:** провести анализ и выявить недостатки существующих систем счисления, которые используются при построении компьютерных систем и компонентов; исследовать возможные пути устранения выявленных недостатков; исследовать структуру двоичных позиционных сумматоров с учетом схемы сложения двух остатков чисел по модулю СОК; разработать метод построения сумматоров по модулю СЗК, который основан на использовании набора двоичных одноразрядных позиционных сумматоров. **Методы исследования:** методы анализа и синтеза компьютерных систем, теория чисел, теория кодирования в СОК. Получены следующие **результаты.** В работе показано, что одним из перспективных направлений повышения производительности КС является применение СОК. Математической основой СОК является китайская теорема об остатках, которая утверждает, что целочисленная операция по одному большому модулю может быть заменена набором операций по взаимно простым малым модулям. Это открывает широкие перспективы для оптимизации вычислений. С одной стороны, можно значительно упростить выполнение сложных и громоздких вычислений, в том числе на малоресурсных вычислительных платформах. С другой стороны, вычисления по разным модулям могут выполняться параллельно, что повышает производительность КС. **Выводы.** В статье рассмотрена операция суммирования двух чисел. Данная операция лежит в основе как для традиционных позиционных систем счисления, так и для СОК, т.е. составляет вычислительную основу всех существующих компонентов КС. Предложен новый метод вычисления суммы остатков чисел по произвольному модулю и приведены примеры, наглядно демонстрирующие эффективность предложенного метода. Данный метод может быть использован в различных компьютерных приложениях, в том числе для повышения производительности вычислений, обеспечения отказоустойчивости и др.

Ключевые слова: система счисления; система остаточных классов; непозиционная кодовая структура; операция сложения; позиционный двоичный сумматор.

Information systems research

UDC 004.7

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.1.08>

Olesia Barkovska, Vladyslav Kholiev, Vladyslav Lytvynenko

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

STUDY OF NOISE REDUCTION METHODS IN THE SOUND SEQUENCE WHEN SOLVING THE SPEECH-TO-TEXT PROBLEM

Abstract. The subject of this research is noise reduction methods in the sound sequence as a part of the proposed speech-to-text (STT) module for converting a verbal lecture or a lesson into a written text form on digital educational platforms. The goal is to investigate the influence of noise reduction methods on the operation of the acoustic signal recognition system. 3 methods of noise reduction were considered for integration in the proposed acoustic artifact recognition system and for the researching: spectral subtraction method; fast Fourier transform; Wiener filter with software modeling of every method. The obtained results: after testing the system with integrated noise reduction modules in it, based on the fast Fourier transform, Wiener filter and spectral subtraction method, it was concluded that the module using the Wiener filter improves the identification results by 25%, which is the highest result. However, performance testing has shown that fast Fourier transform is the fastest method. The practical significance of the work is – the identifying acoustic events system was developed, different noise reduction methods were integrated and researched into the module for converting a verbal lecture or a lesson into a written text form in a proposed system with the aim of increasing of speed and accuracy.

Keywords: speech; voice; processing; noise; reduction; filtering; learning management systems; digital educational platform.

Introduction

The period of the pandemic has significantly increased the relevance of the development and expansion of the functionality of various digital educational platforms [1, 2]. These information spaces are in demand at different levels of education in countries around the world – from primary schools to higher education institutions, as well as training courses in different areas of business, allowing students to be provided with teaching materials, communicating with teachers, and also providing an opportunity for remote control of the level of knowledge. This approach is not a new one [3], that is why now we have not the breakthrough, but the fur-

ther fast development [4, 5]. Thus, the virtual interaction of the distributed user community is organized.

The number of interactive possibilities of digital educational platforms is constantly expanding. New options are added to the basic functionality (access to training materials on cloud storage services, remote interaction with teachers). For example, testing blocks, knowledge control, access level management of training content depending on the user's role, analysis of statistical data (attendance), and some other special functionality like in [6,7]. The generalized structure of a digital educational platform with modules for learning educational material, checking gained knowledge and collecting statistics for monitoring progress is shown in Fig. 1.

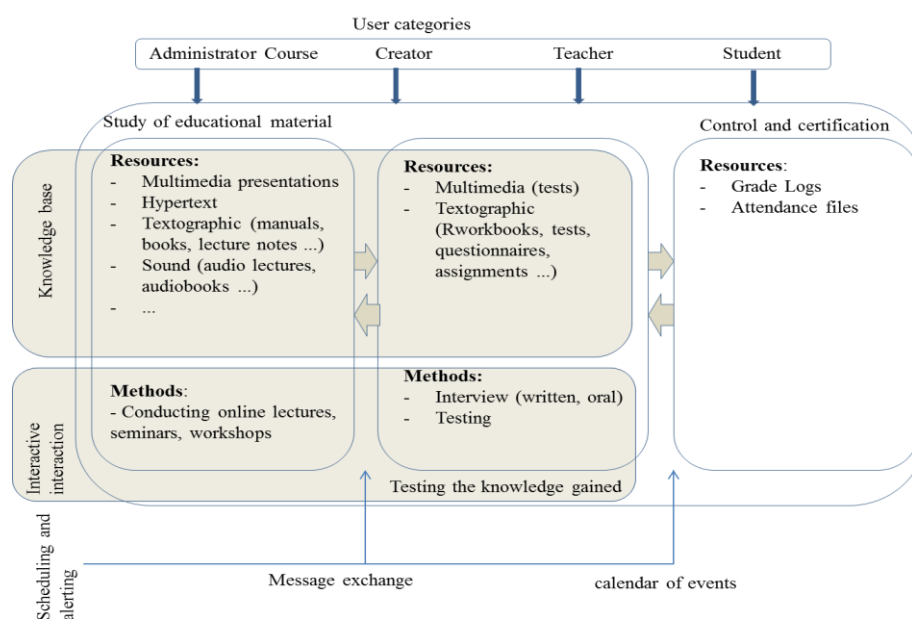


Fig. 1. Generalized structure of a digital educational platform

However an important part of the information space for remote education remains online lectures with experts, which can be conducted in a question-and-answer

mode and cover questions from course participants. Subsequent access to online lecture materials should be easy to understand and assimilate. The recording of the lecture

provides access to audio files that can be listened to, but are not intended for print reproduction.

The two platforms for schools, universities and other educational institutions from the great corporations Google [8, 9] and Microsoft are: G Suite for Education and Microsoft 365 Education. 'Microsoft 365' is the new name for 'Office 365'.

In both cases, the platforms run from the cloud, meaning you can use them through a standard internet browser – perfect for everything from a quick check of a document on a smartphone, or for a student to join a lesson on a desktop computer. And naturally, being browser-based and suitable for multiple devices, they are ideal for remote teaching and learning.

Software and services related to digital educational platform (DEP), which we have in a generalized structure of a DEP (Fig. 1):

- learning management systems (LMS) — integrations with LMS give users of digital learning platforms a streamlined way of sharing assignments with their students. Instructors can also use LMS integrations to track student progress on assignments;

- student information systems (SIS) — an institution's SIS harbors vast stores of student data, including contact information, demographic data, and their academic history. Integrations between these systems and digital learning platforms enable instructors to seamlessly transfer student rosters into digital learning platforms.

They can also export student performance data from a digital learning platform assignment directly into an SIS gradebook;

- document creation software — digital learning platforms that enable instructors to create their own lessons often allow the user to upload files from document creation software.

Therefore, the expansion of existing digital educational platforms with the ability to form an annotation (resume, abstract) of a lecture and its presentation in the form of textographic materials for further use by course students on paper is an urgent task, since it can improve the quality of presentation of educational information and the conditions for working with it, and also to improve the assessment of the quality of the distance educational resource from the point of view of the content and methodological aspect.

The paper proposes converting audio files containing lecture material into text form, keeping only the important content in the form of a summary of the lecture (Fig. 2). So, it is well known speech-to-text (STT) problem in appliance to digital educational platforms. Since the reliability of the information contained in the educational resources of distance courses is one of the key requirements for digital educational platforms, reducing the appearance of false or distorted data when converting a sound sequence into text data for further semantic analysis is the goal of the work.

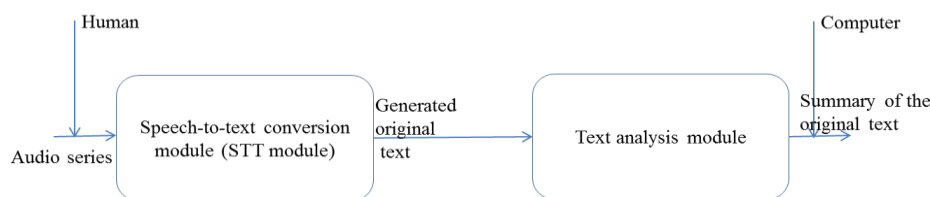


Fig. 2. Basic modules of the proposed system

Analysis of the literature. As the name suggests, a DEP is an online 'environment' comprising applications and tools for the education sector. It's used by teachers, administrative staff and students – and is designed specifically to accelerate digital teaching and learning for schools. A typical DEP contains tried-and-tested productivity software, such as those for word processing, spreadsheets and presentations – as well as email and calendar tools. No doubt you're already familiar with such software. For DEPs, however, these standard applications are bolstered with software for education. This includes virtual whiteboards; planning, assignment, marking and collaboration tools; and software to run lessons by live video.

Here's one example of how this might translate into the real world: a teacher plans the lesson and produce materials using the familiar productivity tools, as well as your school's own curriculum materials stored conveniently in the same platform. Then the mentor can run the lesson either remotely or in-class, using a presentation format, live video, or a mix of both. Based on the lesson, you could then issue an assignment to students, who would complete it remotely and return it through the platform. You could issue the assignment in question-and-answer format created with the platform's

questionnaire tools. Or you might ask the student to submit a typed document – or even a handwritten response using a device stylus. For more practical subjects, the student could submit multimedia formats of their work – for instance, a photo of their drawing, or a video of a musical performance. Once these assignments are completed and submitted, you could mark the work using the marking software. These are tools that go beyond marking up documents with comments – they're intuitive and interactive, and can be set up so the data flows to a spreadsheet tracking the student's progress.

The benefits of using a digital education platform can be the next: teach classes as well as smaller groups of pupils; communicate with their pupils; set tasks for individuals as well as for larger groups; let pupils work together; give feedback; share useful links to digital learning resources; collaborate with their colleagues on lesson planning and related administrative tasks. Below is a ranking list of DEP with Higher Education capabilities (Table 1) [10]. The use of DEP in higher education systems is an important function of digital learning platforms. Some of them are: Canvas LMS, Nearpod, Khan Academy, Lumio by SMART, GoReact, Discovery Education Inc, Speexx, Pear Deck, Renaissance Accelerated Reader, McGraw-Hill and so

on. Comparison of various products is necessary in order to analyze the advantages and disadvantages of existing solutions and substantiate the relevance of the approach proposed in the work.

Table 1 – A ranking list of some of the digital educational platforms

	Alta 	Cerego 	PearDeck 	Schoology 
Meets Requirements	8.6 (20 responses)	8.3 (23 responses)	8.6 (27 responses)	8.5 (266 responses)
Ease of Use	9.2 (20 responses)	8.7 (24 responses)	8.8 (27 responses)	8.5 (266 responses)
Ease of Setup	9.2 (6 responses)	7.6 (13 responses)	Not enough data available	8.4 (71 responses)
Ease of Admin	9.2 (6 responses)	7.2 (13 responses)	Not enough data available	8.6 (74 responses)
Quality of Support	9.5 (20 responses)	8.2 (23 responses)	9.3 (17 responses)	8.4 (226 responses)
Ease of Doing Business With	9.7 (6 responses)	8.5 (12 responses)	Not enough data available	8.9 (59 responses)
Reviewers' Industry				
	Higher Education 86.4%	Higher Education 59.4%	Education Management 40.6%	Education Management 39.0%
	Non-Profit Organization Management 4.5%	E-Learning 12.5%	Primary/Secondary Education 31.3%	Primary/Secondary Education 37.4%
	E-Learning 4.5%	Apparel & Fashion 6.3%	Higher Education 15.6%	Higher Education 9.7%
	Alternative Dispute Resolution 4.5%	Public Relations and Communications 3.1%	E-Learning 6.3%	E-Learning 5.7%
	Other, 0.0%	Maritime, 3.1%	Libraries, 3.1%	Writing and Editing, 0.6%
		Other, 15.6%	Other, 3.1%	Other, 7.5%

It can be seen that these platforms can satisfy many user needs, but still have minor disadvantages.

The analysis showed that according to such criteria as ease of use and meeting the requirements, the Alta system has the highest scores, however, its functionality does not include the possibility of converting a voice lecture or report into a printed form for further use both by students (when preparing for examinations) and by teachers (for example, for compiling work programs or writing a detailed lecture summary). Therefore, the development of a module for converting a verbal lecture or a lesson into a written text form while retaining only important information can be considered a relevant task.

The problem formulation. The quality and speed of converting audio sequence into text, which is a complex task, depend on such factors as the quality of the input signal and the characteristics of the equipment. The purpose of this study is to investigate the influence of noise reduction methods on the operation of the acoustic signal recognition system. To achieve this goal, the following tasks must be solved:

- research of the general parameters of acoustic systems;
- research of existing methods of noise reduction in the audio series;
- development of acoustic event recognition system;
- adaptation of noise reduction methods to different types of computing systems;
- assessment of the operating time of the developed system;
- assessment of the quality of acoustic event recognition;
- analysis of the obtained results.

Results and Discussion

1. Acoustic event recognition system. To study the methods of noise reduction in the audio sequences, a

computer system for recognizing acoustic events was developed, namely: music and its genres, animal sounds divided into classes, transport and its type, random events (knock, explosion, shot, etc.), human speech, natural phenomena, etc.

The system is designed to identify the type of event on a given audio sequences of any size and can be used as a ShotSpotter [11] analogue or to eliminate undesired artifacts when using software for audio and video conferencing [12, 13]. The system is able to work on the following three sources: pre-recorded audio file; capturing and processing microphone data; web-interface.

The system is written in Python, which allows it to be easily adapted and optimized. It uses a predefined model of a neural network of the CNN type. The model is based on the Google AudioSet dataset (the sample size is approximately 2 million segments from different video files, the test sample size is 20,000 segments from different video files), which is publicly available. Overall, the system uses the following external Python libraries: numpy; scipy; resampy; PyAudio; Tensorflow; Six; Devicehive. It should be noted that the neural network is trained on the VGGish model of the Tensorflow platform.

Due to the fact that GPUs are more suitable for training neural networks, and the Tensorflow platform provides the ability to use a graphics processor (with the above software), the following hardware was used: NVidia GeForce RTX 2070 Super 8 GB. Fig. 3 shows the general IDEF0 scheme of the system.

On the left of the diagram the input data to the system is shown, namely the audio sequence (audio file), which must be identified to one or more classes. The top shows the tools used by the system, namely: the TensorFlow platform, which is required for the neural network model to work; a collection of classes required to assign an input audio sequence to a class; YouTube-

8M model, interface for working with the neural network model; Python modules (libraries), required to run each part of the system (for example, os is used to run the system on local files).

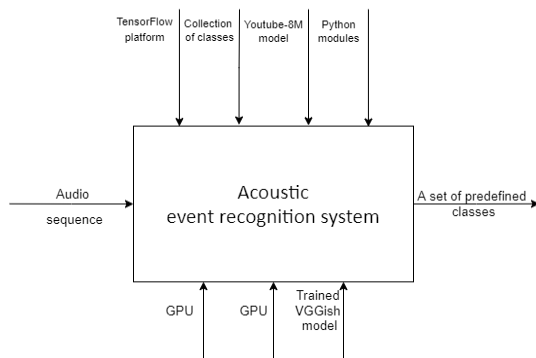


Fig. 3. Generalized scheme of work of acoustic artifact recognition system

The lower inputs are the tools and software that the system uses. The CPU and the VGGish-trained neural network model are mandatory components of the system, while the GPU is desirable but optional. VGGish is a pre-trained convolutional neural network developed by Google. The presence of GPUs in the system improves speed. Fig. 4 shows the functional model of the system.

The proposed system consists of modules: conversion of a file into an array of bits; conversion of an array of bits into a mel spectrogram; conversion of mel spectrogram into frames; obtaining key characteristics; processing of key characteristics; filtering predictions. The tasks of the module to convert a file into an array of bits include: reading a file into a stream; conversion of a stream into an array of bits; array type check. The module takes the input path to the file and outputs an array of bits.

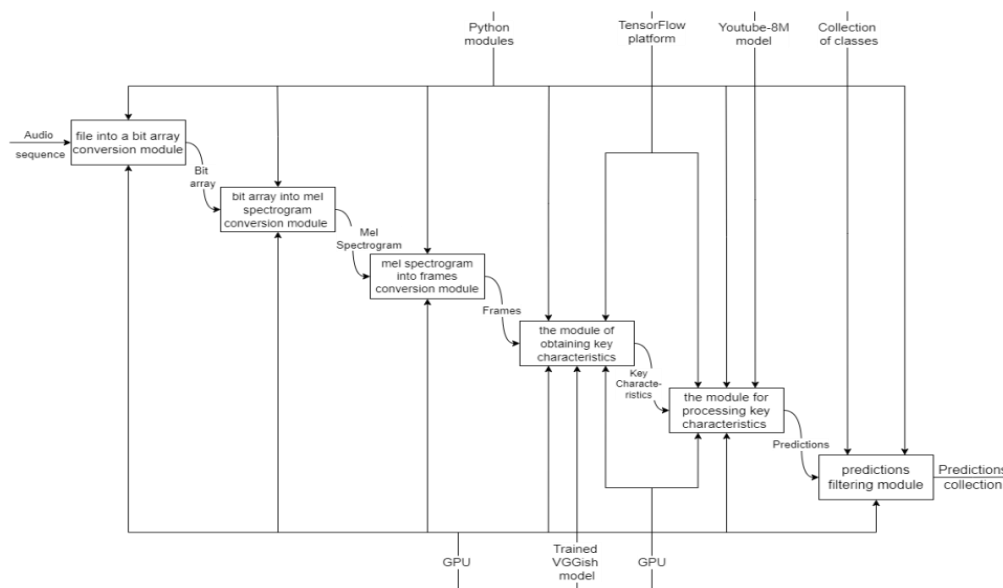


Fig. 4. Functional model of the system

Next is the module for converting an array of bits into a mel spectrogram. Its tasks include: conversion of 2 or more channel signals into mono; short-term (window) Fourier transform; obtaining a logarithmic amplitude mel-frequency spectrogram.

The short-term Fourier transform is performed to be able to obtain a stabilized spectrogram. Next, the obtained spectrogram is fed to the module for converting the mel spectrogram into frames. It has only one task – to divide the spectrogram into segments of 10 milliseconds. The obtained output is an array of frames (segments). The next step is the module of obtaining key characteristics. The essence of this module is to obtain tensors and key characteristics from a set of frames. The tasks of the second to last module for processing key characteristics are: pre-processing of key characteristics by the YouTube-8M module; obtaining predictions from key characteristics. And finally, the last module is prediction filtering. In this case, filtering means rejecting predictions that have not exceeded the specified threshold.

2. Adaptation of the proposed noise reduction methods for computer systems with different types of

memory organization. The basis of this adaptation is the integration of various noise reduction methods into the acoustic event recognition system in order to improve the recognition results. Fig. 5 shows a functional model of a system with an integrated noise reduction module. This module has a single task – pre-processing the audio sequences with one of the methods of noise reduction. An array of bits is fed to the input, and a processed array of the same type is obtained at the output.

This eliminates the need to modify other components of the system. Three methods of noise reduction were considered for integration: spectral subtraction method; fast Fourier transform; Wiener filter. Each of them represents its own version of the noise reduction module, which can be integrated into the system (Fig. 6).

Implementation of each method requires an understanding of the scope of the system.

That is, it needs to be known what kind of event the system needs to identify. For example, if the system needs to recognize a dog's bark, the "useful signal" is in the range of 300 to 3500 Hz, so everything else can be considered "noise".

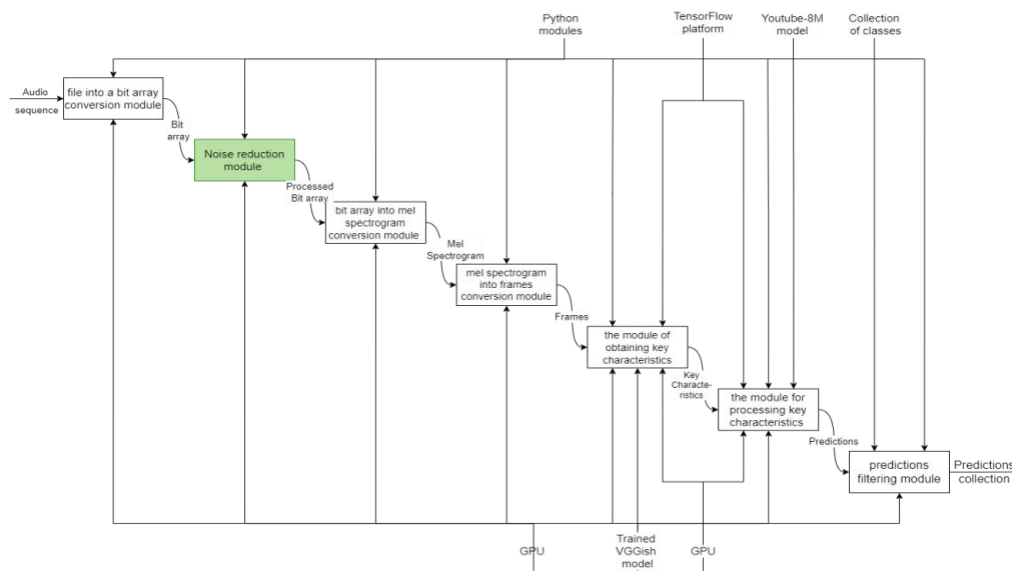


Fig. 5. Functional model of a system with an integrated noise reduction module

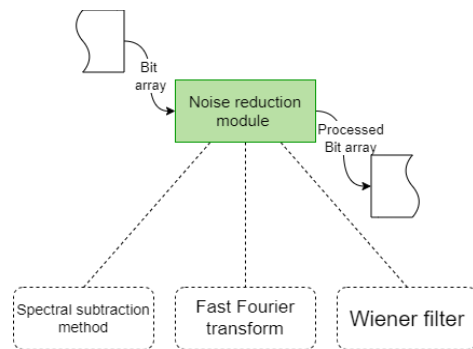


Fig. 6. Noise reduction module of different variations

3. Analysis of the recognition quality of the developed system depending on the methods of noise reduction. The system analysis was performed without an integrated noise reduction module and with three proposed noise reduction methods. The identification threshold was set at 0.8, and the noise type was a synthetically generated white noise of varying strength. Table 2 shows an example of comparing the results of event identification using different noise reduction methods. The value in the table is the identification factor by which the system recognized the event. An audio series of "dog barking" was taken as an example.

The test sample consists of 200 audio files, 50 of which are "dog barking". The overall evaluation of the system was performed using precision and recall metrics with a noise level of 0.5. The precision of a system within a class is the proportion of documents that actually belong to that class for all documents that the system has assigned to that class. Recall of the system is the fraction of the documents assigned by the classifier to the class, to all documents of this class in the test sample. These values are easy to calculate based on the contingency table compiled for each class separately. When using a system without the reduction, 32 samples were marked as "dog barking", of which 29 are correctly recognized and 3 do not belong to this class. Thus we have the following: TP = 29, FN = 21, FP = 3. Then, the precision will be 0.90625 and the recall will be 0.58.

Table 2 – Comparison of noise reduction methods depending on the white noise level

Noise reduction method used	Noise strength		
	0.1	0.5	1.0
No reduction	0,93	0,80	-
Spectral subtraction method	0,96	0,96	0,90
Fast Fourier transform	0,95	0,94	0,92
Wiener filter	0,97	1,00	1,00

Using the noise reduction module of the spectral subtraction method, TP = 46, FN = 4, FP = 1 were obtained. Therefore, the precision is 0.97872 and the recall is 0.92. Using the fast Fourier transform, TP = 45, FN = 5, FP = 3, precision – 0.9375, recall – 0.9. Finally, when using the Wiener filter, the following results were obtained: TP = 49, FN = 1, FP = 0. Therefore, the precision is 1 and the recall is 0.98. Table 3 presents the generalized test results. From Table 3, it can be concluded that the Wiener filter performs the task of noise reduction and improves the results of event identification the best.

Table 3 – Generalized results of event identification system evaluation

Noise reduction method	System evaluation			Metrics		Roe*
	TP	FN	FP	Precision	Recall	
No suppression	29	21	3	0,90625	0,58	-
Spectral subtraction method	46	4	1	0,97872	0,92	21%
Fast Fourier transform	45	5	3	0,9375	0,9	18%
Wiener filter	49	1	0	1	0,98	25%

Roe* – Relative optimization estimate

4. Analysis of system runtime for different noise reduction methods. The analysis of the system runtime was performed in parallel with the identification analysis. Therefore, the sample for testing is the same 200 audio files of the same duration. The countdown of the recognition time begins with the start of the first module – file to bits array conversion module, and the end point of the calculation after the operation of the

last module – the prediction filtering module. Fig. 7 shows the total graph of the time of identification of each sample with each method of noise reduction. The average time of each method was obtained from the graph and set of time metrics:

- no noise reduction method: 2,207 seconds;
- fast Fourier transform: 2,288 seconds;
- Wiener filter: 2,437 seconds;
- spectral subtraction method: 2,663 seconds.

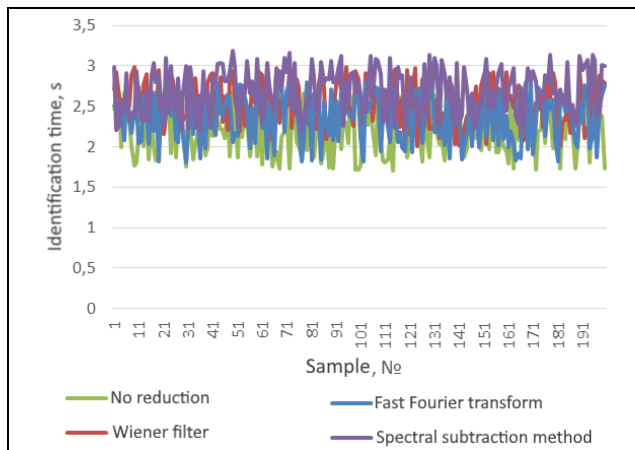


Fig. 7. System runtime comparison with different noise reduction methods

From the average values of the audio event identification time, it can be concluded that the fast Fourier transform is the fastest.

When choosing the noise reduction method for the system, both the processing time of the algorithm and the quality of identification should be taken into account. For example, if on a certain hardware the system processes the audio sequence fast enough that the delay is negligibly small, and the quality of recognition is important to the user, then the Wiener

filter should be chosen as the best according to the results of quality testing. If, for example, the noise level is low and the hardware is not productive enough (for example, in a case of no GPU), a simpler and faster method – fast Fourier transform – should be chosen.

Conclusions

This paper discussed the main applications of audio analytics, such as speech recognition and speech-to-text transformation. Many of them use noise reduction as a basis for improving the signal level, which was demonstrated in the paper as a proposed speech-to-text (STT) module for converting a verbal lecture or a lesson into a written text form on digital educational platforms.

The main methods and algorithms of noise reduction were considered with the presentation of examples of processing results, their computational complexity and the possibility of parallelization. The following methods and algorithms were considered:

- fast Fourier transform;
- Wiener filter;
- spectral subtraction method;
- adaptive filter;
- active noise control;
- use of neural networks.

In addition, a system for identifying acoustic events was developed during the work. The system was tested as is. Also, different noise reduction methods were integrated and researched into the module for converting a verbal lecture or a lesson into a written text form in a proposed system: fast Fourier transform; Wiener filter; spectral subtraction method.

After testing the system with the integration of each of the noise reduction modules, it was concluded that the module using the Wiener filter improves the identification results by 25%, which is the highest result. However, performance testing has shown that fast Fourier transform is the fastest method.

REFERENCE

1. Onyema, E. M., Eucheria, N. C., Obafemi, F. A., Sen, S., Atonye, F. G., Sharma, A., & Alsayed, A. O. (2020), "Impact of Coronavirus pandemic on education", *Journal of Education and Practice*, no. 11(13), pp. 108-121.
2. Arora, A. K. and Srinivasan, R. (2020), "Impact of pandemic COVID-19 on the teaching-learning process: A study of higher education teachers", *Indian journal of management*, no. 13(4), Prabandhan, pp. 43-56.
3. Alaneme, G. C., Olayiwola P. O. and Reju, C. O. (2010), "Combining traditional learning and the e-learning methods in higher distance education: Assessing learners' preference", *4th International Conference on Distance Learning and Education*, pp. 187-190, doi: <https://doi.org/10.1109/ICDLE.2010.5606008>.
4. Faltynkova, L., Simonova I. and Kostolanyova, K. (2020), "Utilization of distance education during COVID_19 crisis", *6th IEEE Congress on Information Science and Technology*, pp. 59-62, doi: <https://doi.org/10.1109/CiSt49399.2021.9357233>.
5. Gorshenin, A. (2018), "Toward Modern Educational IT-ecosystems: from Learning Management Systems to Digital Platforms", *10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, pp. 1-5, doi: <https://doi.org/10.1109/ICUMT.2018.8631229>.
6. Titov, I. and Titov, E. (2013), "Delivering video content in educational platforms", *International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL)*, pp. 726-727, doi: <https://doi.org/10.1109/ICL.2013.6644692>.
7. Jiang, H. (2018), "Design of Innovative Experiment Platform for Network Courses of Modern Educational Technology Based on Virtual Reality", *11th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, pp. 97-100, doi: <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2018.00030>.
8. Kansal AK, Gautam J, Chintalapudi N, Jain S and Battineni G. (2021), "Google Trend Analysis and Paradigm Shift of Online Education Platforms during the COVID-19 Pandemic", *Infectious Disease Reports*, no. 13(2), pp. 418-428, doi: <https://doi.org/10.3390/idr13020040>.
9. Kirange, S., Sawai, D. & Director, I. M. (2021). "A Comparative Study Of E-Learning Platforms And Associated Online Activities", *The Online Journal of Distance Education and e-Learning*, no. 9(2).
10. Cavus, N. and Sekyere-Asiedu, D. (2021), "A comparison of online video conference platforms: Their contributions to education during COVID-19 pandemic", *World Journal on Educational Technology*, no. 13(4), pp. 1162-1173.

11. Watkins, C., Mazerolle, L. G., Rogan, D. and Frank, J. (2002), "Technological approaches to controlling random gunfire: Results of a gunshot detection system field test Policing", *International Journal of Police Strategies & Management*, no. 6, 25 p.
12. Barkovska O., Kholiev V., Pyvovarova D., Ivaschenko G. and Rosinskiy D. (2021), "International system of knowledge exchange for young scientists", *Advanced Information Systems*, Vol. 5, No. 1, pp. 69-74, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.09>.
13. Barkovska O., Pyvovarova D., Kholiev V., Ivashchenko H. and Rosinskiy D. (2021), "Information Object Storage Model with Accelerated Text Processing Methods", *Proceedings of the 5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2021)*, vol. 1, pp. 286-299.

Received (Надійшла) 10.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.02.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Барковська Оlesia Юрійвна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Olesia Barkovska – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: olesia.barkovska@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7496-4353>.

Холєв Владислав Олександрович – аспірант кафедри Електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Vladyslav Kholiev – postgraduate student at the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: vladyslav.kholiev@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9148-1561>.

Литвиненко Владислав Сергійович – студент кафедри Електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Vladyslav Lytvynenko – students of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: vladyslav.lytvynenko@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4376-7629>.

Вивчення методів зниження шуму в звуковому ряді для вирішення задач перетворення мови в текст

О. Ю. Барковська, В. О. Холєв, В. С. Литвиненко

Анотація. Предметом дослідження є методи шумоподавлення у звуковій послідовності у складі пропонованого модуля перетворення мови в текст (STT) для представлення усної лекції або уроку в текстовому вигляді на цифрових освітніх платформах. **Мета** – дослідити вплив методів шумозаглушення на роботу системи розпізнавання акустичного сигналу. Для інтеграції в запропоновану систему розпізнавання акустичних артефактів та для дослідження було розглянуто три методи зменшення шуму: метод спектрального віднімання; швидке перетворення Фур'є; Фільтр Вінера з програмним моделюванням кожного методу. **Отримані результати:** після тестування системи з інтегрованими в неї модулями шумозаглушення на основі швидкого перетворення Фур'є, фільтра Вінера та методу спектрального віднімання було зроблено висновки, що модуль із застосуванням фільтра Вінера покращує результати ідентифікації акустичних артефактів на 25%, що є найвищим результатом. Проте тестування продуктивності показало, що швидке перетворення Фур'є є найшвидшим методом. **Практична значущість роботи** полягає в тому, що запропоновано та розроблено модулі системи ідентифікації акустичних подій, інтегровано різні методи шумозаглушення в модуль для перетворення усної лекції чи уроку в письмову текстову форму в запропонованій системі з метою збільшення швидкості і точності результату.

Ключові слова: мовлення; голос; обробка; шум; скорочення; фільтрація; системи управління навчанням; цифрова освітня платформа.

Изучение методов понижения шума в звуковой последовательности при решении задач преобразования речи в текст

О. Ю. Барковская, В. О. Холєв, В. С. Литвиненко

Аннотация. Предметом исследования являются методы шумоподавления в звуковой последовательности в составе предлагаемого модуля преобразования речи в текст (STT) для представления устной лекции или урока в текстовом виде на цифровых образовательных платформах. **Цель** – исследовать влияние методов шумоподавления на работу системы распознавания акустического сигнала. Для интеграции в предложенную систему распознавания акустических артефактов и для исследования было рассмотрено три метода уменьшения шума: метод спектрального вычитания; быстрое превращение Фурье; Фильтр Винера с программным моделированием каждого способа. **Полученные результаты:** после тестирования систем с интегрированными в нее модулями шумоподавления на основе быстрой трансформации Фурье, фильтра Винера и метода спектрального вычитания был сделан вывод, что модуль с применением фильтра Винера улучшает результаты идентификации акустических артефактов на 25%, что является наивысшим результатом. Тем не менее, тестирование производительности показало, что быстрое преобразование Фурье является самым быстрым методом. **Практическая значимость работы** заключается в том, что предложены и разработаны модули системы идентификации акустических событий, интегрированы и исследованы различные методы шумоподавления в модуль для преобразования устной лекции или урока в форму письменного текста в предложенной системе с увеличением скорости и точности получения результата.

Ключевые слова: речь; голос; обработка; шум; сокращение; фильтрация; системы управления обучением; цифровая образовательная платформа.

Д. А. Гапон, А. О. Зуєв, П. О. Качанов, Б. І. Кубрик

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

ВИЗНАЧЕННЯ ДЖЕРЕЛА ВИЩИХ ГАРМОНІК У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗІ ЗМІШАНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Анотація. Розглянуто метод визначення джерела вищих гармонік струмів і напруг в електричній мережі за напрямками потужності відповідних складових. **Метою** дослідження є оцінка ефективності методу у електричній мережі, яка містить декілька приймачів електричного навантаження різного характеру включених паралельно. Проведено комп’ютерне моделювання фрагменту електричної мережі та електроприймачів навантажень що працюють паралельно. Досліджено різні комбінації активного, реактивного та нелінійного навантаження в цій мережі. У якості нелінійного навантаження використано схему Ларіонова. За **результатами** дослідження зроблено висновки щодо ефективності використання методу. Так, зокрема, визначено що у випадку паралельної роботи нелінійного та змішаного активно-нелінійного навантаження джерело вищих гармонік визначається некоректно. Зроблено пропозиції щодо шляхів покращення методу та алгоритму визначення джерела вищих гармонік.

Ключові слова: електрична мережа; електромагнітна сумісність; джерело вищих гармонік; реактивне та нелінійне навантаження; схема Ларіонова; комп’ютерне моделювання.

Вступ

Згідно ДСТУ EN 50160:2014 одним із важливих показників якості електричної енергії у системах електропостачання є кількісні показники рівнів вищих гармонійних складових напруги та загальний коефіцієнт гармонійних спотворень. Наявність таких складових призводить до підвищення рівню втрат енергії у передавальній мережі, а також такі складові можуть привести до збоїв у роботі деяких електроприймачів. Саме тому, вищі гармоніки у електричній мережі підлягають обов’язковому моніторингу та контролю за допомогою спеціального обладнання та відповідних інформаційних систем. Для ефективної боротьби з підвищеним рівнем гармонійних спотворень перше за все, необхідно визначити їх походження та джерело. Багато наукових праць вітчизняних та закордонних вчених присвячені саме цій проблематиці [1-7]. Не дивлячись на це, на теперішній час не існує загальноприйнятої ефективної методики визначення джерела вищих гармонік яка могла б задовольнити вимоги сучасних підприємств-споживачів електричної енергії в рамках ринкових відносин. Ця стаття спрямована на визначення основних причин, які не дозволяють ефективно вирішити цю проблему.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Найбільш обговорюваними на даний час є такі підходи до визначення джерела вищих гармонік: використання нейронних мереж, емпіричні, та аналітичні методи та визначення джерела вищих гармонік за напрямками потужності відповідних складових.

Питання використання нейронних мереж для розпізнавання та класифікації збурень у електричній мережі розглянуті у [4, 7]. Недоліком таких методів є залежність результатів від способу та послідовності навчання нейронної мережі. Такі методи не дозволяють гарантовано виключити хибне розпізнавання у будь-якому довільному випадку, особливо за наявності комбінації спотворюючих факторів. Емпіричні, та аналітичні методи розглянуті у [5, 8].

Головним недоліком таких методів є необхідність залучення висококваліфікованого персоналу у кожному окремому випадку, неможливість їх автоматизації та універсалізації.

Визначення джерела вищих гармонік за напрямками потужності відповідних складових розглянуто у [8, 9]. Але у [8] вказано, що метод має певні обмеження при роботі у системі з великою кількістю електроприймачів різного принципу дії, та пропонується використовувати статистичні залежності для їх обходу.

Метою статті є аналіз можливості застосування методу визначення джерела вищих гармонік у складних випадках за допомогою комп’ютерного моделювання. На відміну від методів, розглянутих вище, такий підхід може бути застосований у будь-якому випадку з детермінованим та передбачуваним результатом. Практично, визначення джерела вищих гармонік може бути реалізовано за допомогою автоматичних апаратних засобів, які надають відповідні дані до інформаційних систем що входять до складу системи управління електромережею. Тому цей метод було обрано для подальших досліджень.

Згідно з [10], гармонійні спотворення напруги в системах електропостачання виникають внаслідок протікання струмів відповідних складових у приладах передачі, перетворення та розподілу електричної енергії – повітряних лініях, кабелях, трансформаторах, шинах та ін. Падіння напруги виникає як на активному опорі провідників, так і внаслідок наявності реактивних складових – ємності та індуктивності. Таким чином для адекватного визначення параметрів гармонік струмів та напруги необхідно враховувати параметри схеми електропостачання. В якості останньої було обрано розповсюджену схему підстанції 110/10 кВ з двома трансформаторами потужністю 16МВА (рис.1), яка підключена джерела необмеженої потужності за допомогою повітряних ліній електропередач 110 кВ довжиною 20 км. У звичайному режимі, коли все обладнання включено у роботу, вимикачі QS1 та Q1 відключені, тому, фактично, електропостачання споживачів L1...L4 та

L5...L6 є цілком незалежним та не може впливати одне на інше. Виходячи з цього у подальшому розглядається лише взаємодія електроприймачів споживачів L1 та L2, та гілки електричної мережі W1, T1, B1 (рис.2, а). В якості нелінійного навантаження, що генерує вищі гармонійні складові, використано схему Ларіонова, з активним навантаженням (рис.2б). Така схема є поширеною, не потребує додаткового керування, що дозволяє уникнути додаткових умов моделювання. У той же час отримана нелінійність, є достатньою показовою, а гармонійні спотворення струмів є характерними для більшості нелінійних навантажень.

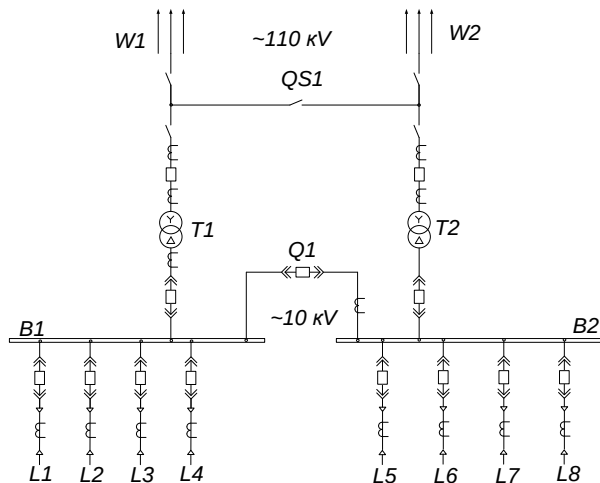


Рис. 1. Схема двохтрансформаторної підстанції
(Fig. 1. Scheme of two-transformer substation)

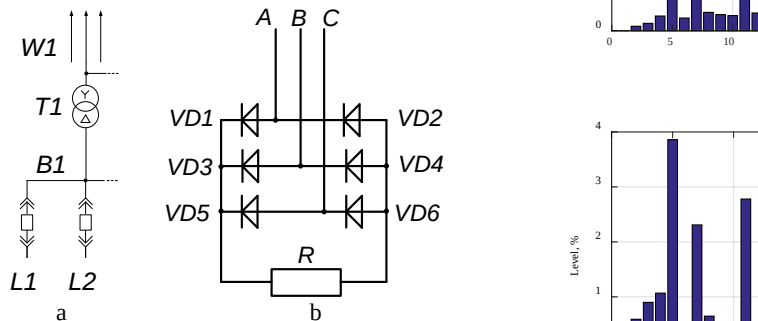


Рис. 2. Виділений фрагмент системи електропостачання споживачів L1 та L2 (а) та елемент нелінійного навантаження (b)

(Fig. 2. Selected fragment of the power supply system of consumers L1 and L2 (a) and the element of nonlinear load (b))

Дослідження та аналіз наведеного методу

В першому випадку модель електропостачання включала два електроприймачі, перший – лінійний, потужністю 5МВт, у вигляді трикутника активних опорів споживача L1 та другий – нелінійний, тієї ж потужності, споживача L2 (рис. 3). Потужність трансформатора, до шин якого підключені навантаження 16МВА. Графіки отриманих в результаті моделювання струмів навантажень та напруги представлені на рис. 4. Для визначення напрямів потужностей гармонійних складових використано розкладання за допомогою ДПФ. Амплітуди гармонік (окрім першої) струмів та напруги показані на рис. 5.

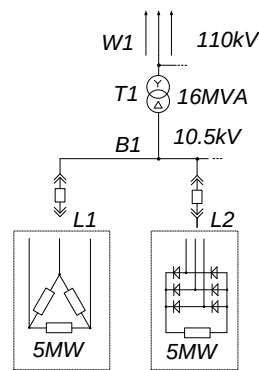


Рис. 3. Паралельна робота лінійного L1 та нелінійного L2 навантаження
(Fig. 3. Parallel operation of linear L1 and nonlinear L2)

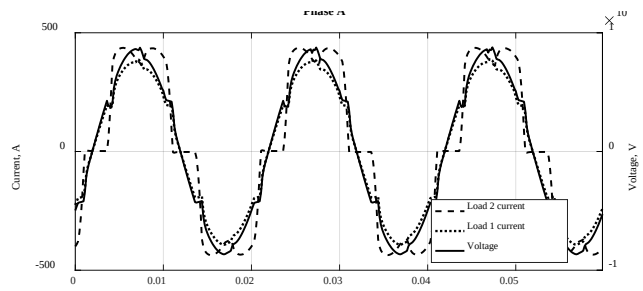


Рис. 4. Струми навантаження та напруга на шинах підстанції
(Fig. 4. Load currents and voltages on substation wires)

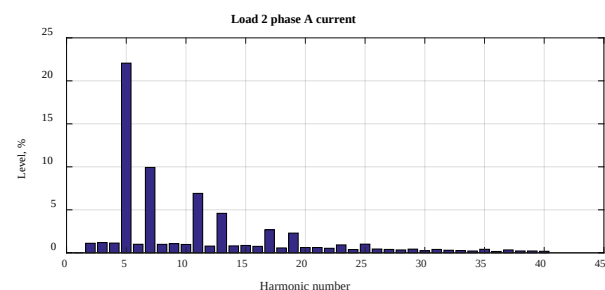
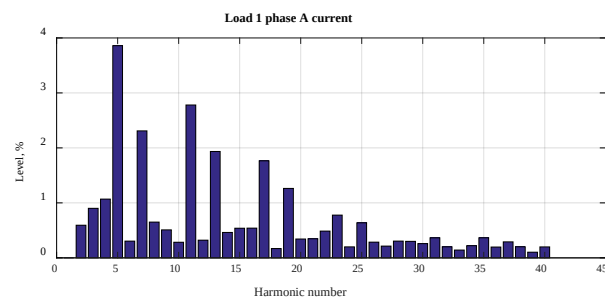
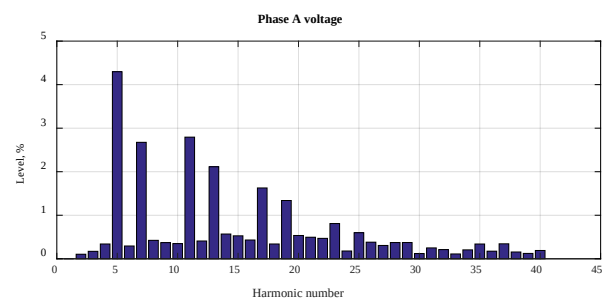


Рис. 5. Гармонійний склад напруги та струмів навантажень L1, L2 (Fig. 5. Harmonic composition of voltages and currents of loads L1, L2)

Рівні гармонійних складових наведено у відносному до першої гармоніки масштабі, при цьому

першу гармоніку із діаграм виключено для більшої інформативності. Як у складі напруги, так і у складах струмів домінують гармоніки з номерами 5,7,11,13,17,19. Це відповідає теоретичним розрахункам та результатам практичних досліджень щодо роботи напівпровідникових перетворювачів у трифазних електричних мережах. Аналіз графіків також

Модуль напруги N -ї гармоніки визначено як

$$|U_N| = \sqrt{(\operatorname{Re}(\dot{U}_N))^2 + (\operatorname{Im}(\dot{U}_N))^2}, \quad (1)$$

де $\dot{U}_N$ – комплекс напруги відповідної гармоніки отриманий за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ).

Відносну фазу гармоніки напруги розраховано як

$$\varphi_{U,N}^* = \varphi_{U,N} - N \cdot \varphi_{U,1}, \quad (2)$$

де $\varphi_{U,N} = \arctan(\operatorname{Im}(\dot{U}_N)/\operatorname{Re}(\dot{U}_N))$.

Відносний модуль гармоніки напруги приведено до напруги першої (основної) гармоніки

$$|U_N|^* = |U_N|/|U_1|. \quad (3)$$

Значення відносної амплітуди струму N -ї гармоніки отримано аналогічно з таким для напруги:

$$|I_N|^* = |I_N|/|I_1|, \quad (4)$$

$$|I_N| = \sqrt{(\operatorname{Re}(\dot{I}_N))^2 + (\operatorname{Im}(\dot{I}_N))^2},$$

де $\dot{I}_N$ – комплекс гармоніки отриманий за допомогою ДПФ.

Відносна фаза N -ї гармоніки струму приведено до фази основної гармоніки напруги:

$$\varphi_{I,N}^* = \varphi_{I,N} - N \cdot \varphi_{U,1}, \quad (5)$$

$$\varphi_{I,N} = \arctan(\operatorname{Im}(\dot{I}_N)/\operatorname{Re}(\dot{I}_N)).$$

Модуль вектору потужності та фаза обчислюються як:

$$|S_N|^* = \frac{|S_N|}{|S_1|} = \frac{|U_N| \cdot |I_N|}{|U_1| \cdot |I_1|} = |U_N|^* \cdot |I_N|^*, \quad (6)$$

$$\varphi_{S,N} = \varphi_{I,N} - \varphi_{U,N}.$$

Таким чином, згідно методики, вважається що споживач генерує вищу гармонічну складову, якщо знак активної складової комплексу потужності є від'ємним, тобто, в даному випадку, кут зсуву $\varphi_{S,N}$ є більшим ніж 90° , або меншим -90° .

У табл. 1 та 2 наведено числові дані, щодо гармонік навантажень L1 та L2. Аналіз даних у таблиці дозволяє говорити про ефективність визначення споживача L2 як джерела усіх вагомих вищих гармонічних складових, тому що для усіх гармонік окрім основної кут зсуву між напругою та струмом (кут вектору потужності) перевищує 90 градусів. У той же час, для навантаження L1 значення кутів близькі до 0 , що говорить про воно виступає виключно як споживач вищих гармонік.

Таблиця 1 – Характеристики гармонічних складових споживача L1

N_h	$ S_N ^*$	$\varphi_{S,N}$	$ U_N ^*$	$\varphi_{U,N}^*$	$ I_N ^*$	$\varphi_{I,N}^*$
1	1	0	1	0	1	0
5	0.0017	3	0.043	-83	0.0386	-80
7	0.0006	0	0.0268	-177	0.0231	-177
11	0.0008	-3	0.0279	-165	0.0278	-168
13	0.0004	-4	0.0211	115	0.0193	111
17	0.0003	1	0.0163	110	0.0176	111
19	0.0002	-7	0.0134	44	0.0126	38

Таблиця 2 – Характеристики гармонічних складових споживача L2

N_h	$ S_N ^*$	$\varphi_{S,N}$	$ U_N ^*$	$\varphi_{U,N}^*$	$ I_N ^*$	$\varphi_{I,N}^*$
1	1	-6	1	0	1	-6
5	0.0095	99	0.043	-83	0.2206	15
7	0.0027	103	0.0268	-177	0.0993	-74
11	0.0019	111	0.0279	-165	0.0691	-54
13	0.001	111	0.0211	115	0.0459	-134
17	0.0004	123	0.0163	110	0.0268	-126
19	0.0003	118	0.0134	44	0.023	163

Далі моделювалась паралельна робота змішаного та нелінійного навантаження (рис. 6).

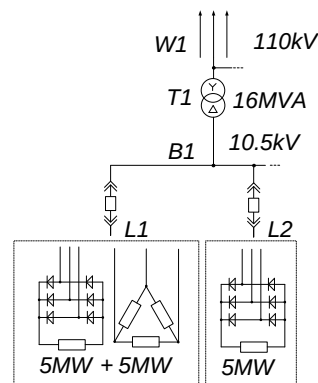


Рис 6. Паралельна робота змішаного L1 та нелінійного L2 навантаження
(Fig 6. Parallel operation of mixed L1 and non-linear L2 load)

Фактично нелінійна частина обох навантажень є однаковою, але навантаження L1 додатково містить таку саму лінійну схему, як і у попередньому випадку. З точки зору фізичних процесів обидва навантаження повинні генерувати струми вищих гармонік у рівних долях. Осцилограми напруги та струмів наведено на рис. 7. На осцилограмах можна побачити, що обидва струми мають спільні характерні нелінійні спотворення, які впливають на форму напруги.

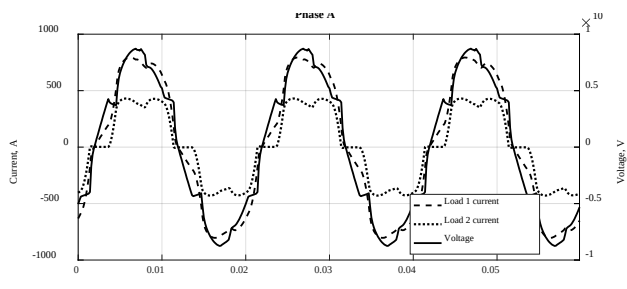


Рис. 7. Осцилограми паралельної роботи навантаження L1 та нелінійного L2
(Fig. 7. Oscillograms of parallel operation of mixed load L1 and nonlinear L2)

На рис.8 можна побачити гармонійний склад напруг та струмів на шинах навантажень. Слід відмітити що двохкратне збільшення потужності нелінійного навантаження викликає приблизно пропорційне збільшення рівнів гармонік напруги на шинах підстанції.

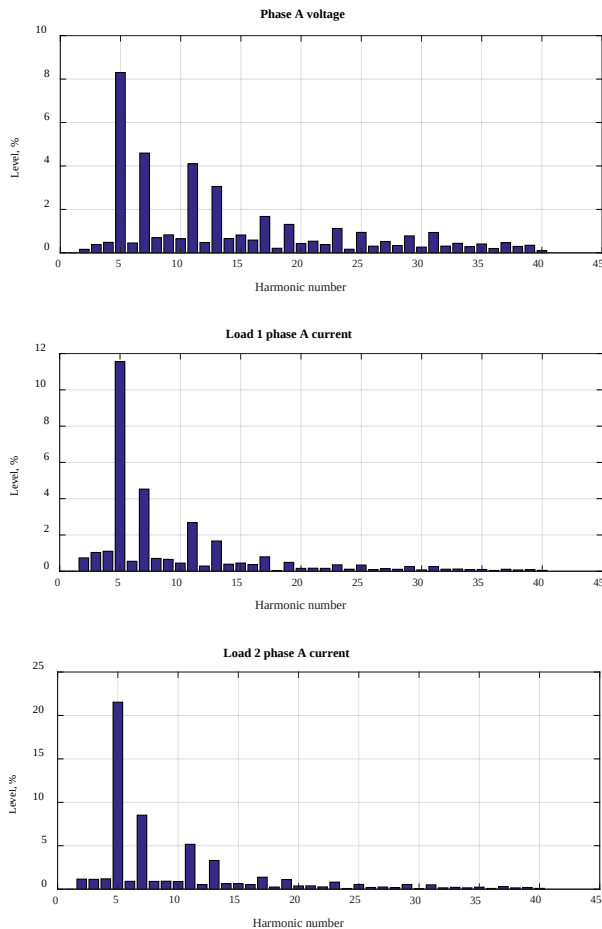


Рис. 8. Гармонійний склад напруги та струмів навантажень L1, L2
(Fig. 8. Harmonic composition of voltages and currents of loads L1, L2)

У табл. 3 та 4 наведено відносні параметри гармонік напруги та струмів. Згідно наведених результатів $\varphi_{S,N}$ у табл. 3 для усіх гармонік не перевищує 82 градусів, у той час як для навантаження L2 (табл. 4) він перевищує 100 градусів для усіх гармонік. Тобто з точки зору методики генерація гармонік відбувається споживачем L2, хоча фактично обидва споживача мають ідентичні нелінійні частини навантаження. Таким чином, для змішаного навантаження результати інтерпретуються не коректно.

Таблиця 3 - Характеристики гармонійних складових споживача L1

N_h	$ S_N ^*$	$\varphi_{S,N}$	$ U_N ^*$	$\varphi_{U,N}^*$	$ I_N ^*$	$\varphi_{I,N}^*$
1	1	-4	1	0	1	-4
5	0.0096	82	0.083	-107	0.1156	-25
7	0.0021	78	0.0459	155	0.0453	-127
11	0.0011	70	0.041	136	0.0268	-154
13	0.0005	68	0.0306	58	0.0167	126
17	0.0001	66	0.0168	-4	0.008	62

Таблиця 4 - Характеристики гармонійних складових споживача L2

N_h	$ S_N ^*$	$\varphi_{S,N}$	$ U_N ^*$	$\varphi_{U,N}^*$	$ I_N ^*$	$\varphi_{I,N}^*$
1	1	-8	1	0	1	-8
5	0.0179	100	0.083	-107	0.2153	-7
7	0.0039	103	0.0459	155	0.0853	-102
11	0.0021	112	0.041	136	0.0517	-111
13	0.001	114	0.0306	58	0.0331	172
17	0.0002	123	0.0168	-4	0.0138	120
19	0.0001	127	0.0131	-63	0.0111	64

В третьому експерименті розглянуто паралельну роботу активно-реактивного та нелінійного навантаження (рис. 9). При цьому параметри реактивної частини підбрані таким чином, що споживана реактивна потужність дорівнює такій що генерується, тобто імітується споживач з встановленим компенсатором реактивної потужності. Осцилограми напруги та струмів наведено на рис. 10. На осцилограмі струму L1 можна побачити коливання на кратній вищій частоті, які були відсутні у попередніх експериментах. Такі коливання є наслідком резонансних явищ у системі електропостачання, і можуть призводити до пошкодження обладнання [3, 5].

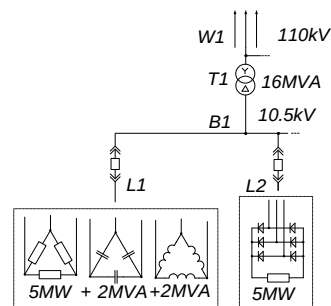


Рис 9. Паралельна робота змішаного L1 та нелінійного L2 навантаження
(Fig 9. Parallel operation of mixed L1 and non-linear L2 load)

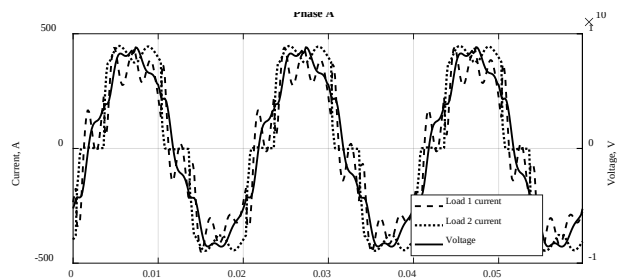


Рис. 10. Осцилограми паралельної роботи активно-реактивного L1 та нелінійного L2 навантаження
(Fig. 10. Oscillograms of parallel operation of active-reactive L1 and nonlinear L2 load)

На рис. 11 показано гармонійний склад напруги та струмів. Спостерігається зростання рівнів вищих гармонік у складі напруги, порівняно з випадком 1, хоча потужність та гармонійний склад нелінійного навантаження залишились незмінними. Також помітне зростання рівнів вищих гармонік струмів для навантаження L1 яке не має нелінійних складових, та за умови відсутності у мережі інших навантажень виглядає як суто активне.

У табл. 5 та 6 наведено дані щодо потужностей та фаз гармонік навантажень. Виходячи із куту зсуву фази вектора потужності споживач один спо-

живає усі гармоніки, окрім 17-ї та 23-ї, а споживач L2 є таким, що генерує гармоніки (окрім 17-ї).

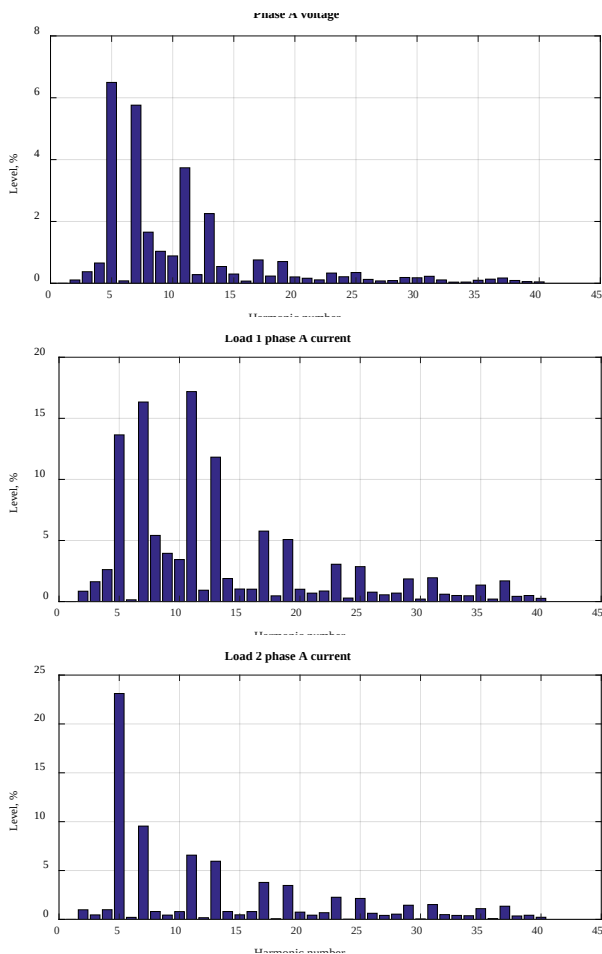


Рис. 11. Гармонійний склад напруги та струмів навантажень L1, L2
(Fig. 11. Harmonic composition of voltages and currents of loads L1, L2)

Але навантаження 1 не має нелінійних елементів і, тому, не може виступати у ролі генератора струмів. Зважаючи на малу амплітуду 17 та 23 гармонік напруги такий результат можна пояснити наявністю похибки розрахунків. В цілому ж методика дозволяє коректно виявити джерело вищих гармонійних складових. Слід зауважити, що дана модель демонструє проблему взаємодії ємнісних пристроїв компенсації реактивної потужності та нелінійних електроприймачів.

Згідно [4, 7] така проблема є реальною і не має загальноприйнятого рішення, що підтверджує

актуальність досліджень з моніторингу та усуненню вищих гармонійних складових напруг та струмів у системах електропостачання.

Таблиця 5 - Характеристики гармонійних складових споживача L1

N_h	$ S_N ^*$	$\varphi_{S,N}$	$ U_N ^*$	$\varphi_{U,N}^*$	$ I_N ^*$	$\varphi_{I,N}^*$
1	1	-0	1	0	1	-0
4	0.0002	75	0.0066	154	0.0262	-131
5	0.0089	65	0.065	-70	0.1365	-5
7	0.0094	69	0.0576	-153	0.1633	-83
8	0.0009	86	0.0165	164	0.0542	-110
9	0.0004	85	0.0104	52	0.0395	137
10	0.0003	78	0.0089	-19	0.0344	59
11	0.0064	77	0.0374	122	0.1719	-161
13	0.0027	77	0.0225	50	0.1182	127
14	0.0001	71	0.0054	13	0.0189	84
17	0.0004	93	0.0076	61	0.0577	154
19	0.0004	80	0.007	9	0.0508	89
23	0.0001	115	0.0033	10	0.0306	125

Таблиця 6 – Характеристики гармонійних складових споживача L2

N_h	$ S_N ^*$	$\varphi_{S,N}$	$ U_N ^*$	$\varphi_{U,N}^*$	$ I_N ^*$	$\varphi_{I,N}^*$
1	1	-2	1	0	1	-2
5	0.015	103	0.065	-70	0.2311	33
7	0.0055	122	0.0576	-153	0.0955	-31
8	0.0001	103	0.0165	164	0.0081	-93
11	0.0025	-120	0.0374	122	0.0658	1
13	0.0013	-113	0.0225	50	0.0595	-63
17	0.0003	-85	0.0076	61	0.0378	-24
19	0.0002	-103	0.007	9	0.0347	-94

Висновки

1. Визначення джерела вищих гармонік за напрямком активної складової потужності кожної гармоніки є найбільш ефективним та практичним інструментом на сьогоднішній день.

2. В багатьох випадках метод дозволяє коректно детектувати генерацію нелінійних струмів, але у випадку, коли має місце взаємодія змішаних навантажень у межах окремих споживачів, результат може бути хибним, і вся відповідальність покладається на гілку з найбільшою пропорцією нелінійності.

3. Дослідження дозволило простежити походження вищих гармонік напруги у електричних мережах та резонансні явища, як проблему електромагнітної сумісності електроприймачів. Наведений метод потребує подальшого розвитку та удосконалення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ (REFERENCE)

- Xu, Y., Du, Y. & Cheng, S. (2018), "A Method of De-noise and Harmonics Detection in Power System Based on Periodicity Analysis", *MAPAN*, Vol. 33, pp. 169–177, doi: <https://doi.org/10.1007/s12647-017-0248-y>.
- Xu, M., Pan, T. and Chen, J. (2019), "A Harmonic Detection Method for Distributed Generation Connected Grid System Using DWT and HHT", *J. Electr. Eng. Technol.*, Vol. 14, pp. 1495–1503, doi: <https://doi.org/10.1007/s42835-019-00190-1>.
- Ray, P, Budumuru, G.K. and Mohanty B.K. (2018), "A comprehensive review on soft computing and signal processing techniques in feature extraction and classification of power quality problems", *J Renew Sustain Energy*, Vol. 10(2):025102, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5006772>.
- Uyar, M., Yildirim, S. and Gencoglu, M.T. (2009), "An expert system based on S-transform and neural network for automatic classification of power quality disturbances", *Expert Syst Appl.*, Vol. 36, pp. 5962–5975.

5. Shukula S., Mishra, S., Singh, B., and Kumar, S. (2017), "Implementation of empirical mode decomposition based algorithm for shunt active filter", *IEEE Trans Ind Appl.*, Vol. 53(13): pp. 2392–2400.
6. Filyanin, D. (2018), "Identification of harmonic distortion sources in distribution systems using Discrete Fourier Transform on periods", *Енергетика: економіка, технології, екологія*, №2. С. 110–119.
7. Філянін, Д.В. (2018), "Визначення ступеню участі суб'єктів електричної мережі в розподілі потужності вищих гармонік", *Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України*, Вип. 195, С. 61–62.
8. Stevanović, D., Petković, P. (2015), "A single-point method for identification sources of harmonic pollution applicable to standard power meters", *Electr Eng.*, Vol. 97, pp. 165–174, doi: <https://doi.org/10.1007/s00202-014-0324-z>.
9. Lu C.L. and Huang, P.H. (2013), "Power system stability study with empirical mode decomposition.", *Adv Mater Res.*, Vol. 732–733, pp. 905–908, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.732-733.905>.
10. Yi-kang, H., Dan, S., Wen-ju, W. (2002), "Harmonic detection an AC excited generation system based on in-phase correlation filtering", *J. Zhejiang Univ.-Sci.*, Vol. 3, pp. 65–71., doi: <https://doi.org/10.1007/BF02881845>.
11. Dağ, O., Uçak, C. & Usta, Ö. (2012), "Harmonic source location and meter placement optimization by impedance network approach. *Electr Eng.*, Vol. 94, pp. 1–10, doi: <https://doi.org/10.1007/s00202-011-0213-7>.

Received (Надійшла) 03.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.01.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Гапон Дмитро Анатолійович – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Dmytro Gapon – Doctor of technical sciences, Associate Professor, head of the department of Power Systems Automation and Cybersecurity, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Харків, Україна;
e-mail: Dmytro.Gapon@khpri.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8609-9707>.

Зуєв Андрій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматики та управління в технічних системах, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Andrey Zuev – Candidate of technical sciences, Associate Professor, head of the department of automation and control in technical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Харків, Україна;
e-mail: dakarton@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8206-4304>.

Качанов Петро Олексійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматики та управління в технічних системах, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Petro Kachanov – Doctor of technical sciences, Professor, Professor of the department of automation and control in technical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Харків, Україна;
e-mail: kpa@khpri.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0781-0853>.

Кубрик Борис Іванович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Boris Kubryk – Candidate of technical sciences, Associate Professor, Associate Professor of the department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Харків, Україна;
e-mail: Borys.Kubryk@khpri.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8327-0350>.

Определение источника высших гармоник в системах электроснабжения со смешанной нагрузкой

Д. А. Гапон, А. А. Зуев, П. А. Качанов, Б. И. Кубрик

Аннотация. У статті розглянуто можливість визначення джерела вищих гармонік струмів і напруг в електричній мережі за напрямками потужності відповідних складових. **Метою** дослідження є оцінка ефективності теоретичних методів та моделювання фрагмента електричної мережі з паралельно працюючих приймачів електричного навантаження. Проведено комп'ютерне моделювання фрагменту електричної мережі та електроприймачів навантажень що працюють паралельно. Досліджено різні комбінації активного, реактивного та нелінійного навантаження в цій мережі. У якості нелінійного навантаження використано схему Ларіонова. За **результатами** дослідження зроблено висновки щодо ефективності використання методу. Так, зокрема, у випадку паралельної роботи нелінійного та змішаного активно-нелінійного навантаження джерело вищих гармонік визначається некоректно. Зроблено пропозиції щодо шляхів покращення методу та алгоритму визначення джерела вищих гармонік.

Ключові слова: електрична мережа; електромагнітна сумісність; джерело вищих гармонік; реактивне та нелінійне навантаження; схема Ларіонова; комп'ютерне моделювання.

Determination of higher harmonics source in mixed-load power supply systems

Dmytro Gapon, Andrey Zuev, Petro Kachanov, Boris Kubryk

Abstract. The article considers the possibility of determining the source of higher harmonics of currents and voltages in the electrical network in the directions of power of the respective components. The research **purpose** is evaluating the effectiveness of theoretical methods, computer modeling of a fragment of the electrical network and electrical load receivers operating in parallel. Different combinations of active, reactive and nonlinear loading are investigated. Larionov's scheme was used as a nonlinear load. According to the **results** of the study, conclusions were made about the effectiveness of the method used. Thus, in particular, in the case of parallel operation of nonlinear and mixed active-nonlinear load, the source of higher harmonics is determined incorrectly. Suggestions for ways to improve the algorithm are made.

Keywords: electrical network; electromagnetic compatibility; source of higher harmonics; reactive and nonlinear loading; Larionov's scheme; DFT.

Bayram Ibrahimov¹, Elshan Hashimov², Aziz Talibov², Arif Hasanov²

¹ Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

² Military Academy of the Armed Forces of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

RESEARCH AND ANALYSIS INDICATORS FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES USING SPECTRAL TECHNOLOGIES

Abstract. The fiber-optic communication lines and fiber-optic transmission systems using fiber-optic cable, receiving and transmitting optical modules based on WDM and DWDM (Wavelength Division Multiplexing & Dense WDM) technologies are studied. A method for calculating the transmission characteristics fiber-optic communication lines is proposed and relationships are obtained that establish an analytical relationship between the length regeneration section and the transmission rate. This paper discusses the study and analysis indicators fiber-optic communication lines using spectral WDM and DWDM technologies.

Keywords: fiber-optic communication lines attenuation; WDM; transfer characteristics; optical signal; DWDM.

Introduction

The intensive development next generation NGN (Next Generation Network) multiservice telecommunication networks based on modern fiber-optic communication lines (FOCL) and fiber-optic transmission systems (FOTS) requires the creation distributed optical transmission systems [1, 2] using fiber-optic cable (FOC), receiving and transmitting optical modules (ROM and TOM). The conducted researches and the analysis have shown [1, 3, 4], that ROM, FOC and TOM based on FOCL are mainly characterized by important parameters of the optical signal transmission system. These parameters are the transmission characteristics of the fiber-optic link and determine the possibilities practical use of the FOC. However, the transmission characteristics FOCL mean the following indicators optical signal transmission systems: refractive index, numerical aperture and normalized frequency, bit rate of optical signals, types attenuation, variance types and bandwidth of the FOC. Our research is devoted to solving the problem creating methods for calculating the transmission characteristics fiber-optic communication lines using the ROM, FOC and POM, which makes it possible to ensure the transmission and reception optical signals efficiently.

Main part

I. General statement of the problem. Analyzed [1, 5], it was determined that the main stimulus for the development fiber-optic communication lines, as mentioned in [3, 4, 6], was the possibility using them as a transmission medium in both backbone and distributed communication systems using optical WDM and DWDM technologies (Wavelength Division Multiplexing & Dense WDM, ITU-T, G.692, ..., G.697).

Studies [3, 6, 7] show that ineffective use of bandwidth limits both the maximum optical data transmission rate, the signal-to-noise ratio at the output of the regeneration section under the influence of chromatic dispersion, and the distance over which the signal can be transmitted. The transmission characteristics fiber optic links are an important indicator.

In addition to the wavelength of the radiation, the main factors affecting the fiber-optic link efficiency and the nature of the propagation light λ_i , $i = \overline{1, n}$ in the fiber are attenuation, dispersion types, and the bandwidth of the FOC.

It is known [3, 7, 8, 9] that a small attenuation and a small dispersion of the signal make it possible to build sections communication lines without regenerators with a length up to 100 km or more, i.e. the maximum distance $L_p \rightarrow L_{p, \max}$ to which optical signals can be transmitted without intermediate regenerators with optical amplifiers. To solve this problem, it is proposed to create methods for calculating the transmission characteristics fiber-optic links, taking into account the ROM, FOC and TOM indicators, as well as the capacity of the FOTS.

II. Creation methods for calculating the transmission characteristics FOCL Based on the study transmission characteristics FOCL, it is established that the formalization of the problem of the efficiency of the operation optical signal transmission systems based on WDM&DWDM technologies can be represented as a set performance indicators for each of the subsystems:

$$E_{ef}(\lambda_i) = W_1 \{ \max[V_b, \Delta F(\lambda_i), L_p] \}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Expressions (1) determine the primary parameters of the transmission characteristics of the fiber-optic link and characterize the bit rate optical signals V_b over the fiber optic link, the length of the FOC L_{foc} and the bandwidth of the FOTS, $\Delta F(\lambda_i)$.

Taking into account the parameters of the FOC and the relative difference in the refractive indices of the fiber core Δ_b , the bit rate optical signal V_b transmission over the FOCL is determined as follows:

$$V_b = \frac{1}{L_{foc}} \cdot \frac{n_2^2}{n_1^2 \cdot \Delta_b} \cdot C_{\max}(\lambda, L_p), \quad \text{bit/s}, \quad (2)$$

where L_{foc} – the length of the FOC; n_1 – is the refractive index of the fiber core; n_2 – is the refractive index of the

shell; $C_{\max}(\lambda, L_p)$ – the maximum value of the bandwidth of the FOTS with wavelengths λ and is determined by the following expression:

$$C_{\max}(\lambda, L_p) = V_b \cdot [\eta_{ie}(n_1, \lambda, n_2, L_p)]^{-1}, \quad (3)$$

where $\eta_{ie}(n_1, \lambda_i, n_2, L_p)$ – is the coefficient effective use FOCL, taking into account their transfer characteristics and $\eta_{ie}(n_1, \lambda_i, n_2, L_p) \leq 1$; L_p – the length of the regenerative section FOCL with spectral separation ($L_p \rightarrow L_{olk}$) channel communications.

It follows from expression (2) and (3) that one the key parameters is the bit rate optical signals, which significantly affects the transmission characteristics FOCL using WDM and DWDM technologies.

Studies calculation methods have shown [3, 5, 10] that an important characteristic transmission lines is the control of the attenuation optical signal in fiber-optic cables and the types dispersion FOCL that significantly affect the efficiency FOTS with wavelength λ_i :

$$E_{ef}(\lambda_i) = W_2 \{ \min[\alpha(L_p, \lambda_i), \tau(L_p, \lambda_i)] \}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

where $\alpha(L_p, \lambda_i)$ – the attenuation of the optical fiber signal FOCL with wavelengths λ_i and the length of the regeneration section L_p ; $\tau(L_p, \lambda_i)$ – dispersion FOCL with wavelengths λ_i and the length of the regeneration section L_p .

III. Estimation attenuation parameters for FOCL in the transmission optical signals. Investigations of the physical values fiber attenuation parameters FOCL in the transmission optical signals show [3, 5] that the attenuation an optical signal in FOCL is an important factor that is necessary for the creation efficient optical transmission systems.

The main types attenuation in fiber optic cables used on FOCL, which determine the main types fiber loss [6, 7, 8, 11] and are divided into four groups: a) Own losses; b) Cable loss; c) Absorption losses; d) Losses in scattering.

It should be noted that the fiber optic attenuation in the optical fiber determines the measure of attenuation of the optical power propagated along the fiber optic path between its two cross sections at a given wavelength λ_i . The attenuation in the FOC is determined by the expression [3]:

$$\alpha(\lambda_i) = 10 \lg [P_{out}(\lambda_i) / P_{in}(\lambda_i)], \quad i = \overline{1, n}, \text{ dB}. \quad (5)$$

It follows from (5) that part of the power entering the fiber input $P_{in}(\lambda_i)$, is scattered because of the change in the direction of the propagated rays in irregularities and their emission to the surrounding space, the other part power is absorbed by the FO material in the form polarization of the dipoles FO, by extraneous impurities, which manifests itself in the form joule heat, as a result of which the power at the input $P_{out}(\lambda_i)$ decreases.

Various types signal attenuation in the linear path, such as kilometric, residual and transient attenuation for estimating the parameters of an optical fiber are investigated. Among them, kilometric attenuation occupies a special place in the telecommunications system using ROM, FOC and TOM based on modern WDM and DWDM technologies, and the unit of measurement is expressed in dB/km.

Considering the main types losses in fiber, the FOC attenuation coefficient is determined by the intrinsic fiber losses and is expressed as follows:

$$\alpha(\lambda_i) = \alpha_{pp}(\lambda_i) + \alpha_{nm}(\lambda_i) + \alpha_{mk}(\lambda_i) + \alpha_{np}(\lambda_i), \text{ dB/km}, \quad (6)$$

where $\alpha_{pp}(\lambda_i)$, $\alpha_{nm}(\lambda_i)$, $\alpha_{mk}(\lambda_i)$, $\alpha_{np}(\lambda_i)$ – are the components of the attenuation coefficient due to rayleigh scattering, absorption in the fiber material, infrared absorption, and absorption by FOC impurities, respectively.

Based on the studies carried out, it is established [3, 8] that for the estimation of kilometric damping parameters there are certain points in the FOCL where the main losses in the FOC arise. It was found that the main losses arise [4, 6, 9, 10, 11]:

- when optical signals are input to the FOC, $\alpha_{bb}(\lambda_i)$, $i = \overline{1, n}$;
- when optical signals are transmitted directly to the FOC itself, $\alpha_{bok}(\lambda_i)$;
- when connecting - in detachable and non-detachable places, $\alpha_c(\lambda_i)$.

Thus, based on [1, 3], the attenuation coefficient FOCL is determined as follows:

$$\alpha_{ob.3}(\lambda_i) = \alpha_{bb}(\lambda_i) + \alpha_{bok}(\lambda_i) + \alpha_c(\lambda_i), \text{ dB/km}. \quad (7)$$

The investigation showed [1, 3, 5] that in order to increase the efficiency FOCL, it is necessary to study methods for estimating the dispersion parameters are conducted and the transmission bandwidth optical information transmission systems.

IV. The investigation dispersion and passband parameters FOCL. The intensive development optical information transmission systems using TOM, FOC and ROM requires a systematic approach to studying the transfer characteristics FOCL. At the same time, an important parameter FOCL, using the technology spectral separation channels -WDM and DWDM, is dispersion and bandwidth.

It is known [3, 5] that the dispersion FOCL is the pulse broadening, i.e. the dispersion has the dimension of time and is defined as the quadratic difference between the pulse durations at the output and the FOC input of length L_p by formula

$$\tau(L_p, \lambda_i) = [t_{oblx}^2(\lambda_i) - t_{ex}^2(\lambda_i)]^{0.5} \leq 0,25 / V_b, \text{ ps}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (8)$$

It should be noted that when the broadening is sufficiently large, the pulses begin to overlap, so that their isolation becomes impossible when optical signals are received. The FOCL variance is generally characterized by three main factors, like the transfer characteristics ROM, FOC and TOM [5, 9, 10, 11]:

- the difference in the propagation velocities of the guided modes-the intermode mode, $\tau_{\text{мод}}(\lambda_i)$;
- dispersion by the guiding properties of the light guide structure-waveguide dispersion, $\tau_{\text{вв}}(\lambda_i)$
- properties of the material of the optical fiber-material dispersion math, $\tau_{\text{мат}}(\lambda_i)$.

In this case, the resulting dispersion $\tau_{p,\text{duc}}(\lambda_i)$ with wavelengths λ_i is determined from the formula [5]:

$$\tau_{p,\text{duc}}(\lambda_i) = \tau_{\text{мат}}(\lambda_i) + \tau_{\text{xp}}^2(\lambda_i) + \tau_{\text{мод}}^2(\lambda_i) - \\ = \tau_{\text{мод}}^2(\lambda_i) + [\tau_{\text{мат}}(\lambda_i) + \tau_{\text{вв}}(\lambda_i)]^2 + \tau_{\text{мод}}^2(\lambda_i). \quad (9)$$

For FOCL, the dispersion is generally calculated per 1 km and measured in ps/km.

Given the above, it is possible to determine the chromatic dispersion, which is related to the specific chromatic dispersion by a simple ratio

$$\tau_{xp}(L_p, \lambda_i) = D_{xp}(\lambda_i) = D_{xp}(L_p, \lambda) \times \\ \times \Delta\lambda_i, \text{ ps/nm} \cdot \text{km}, \quad (10)$$

where $\Delta\lambda_i$ – width of the radiation spectrum of the source, μm , $i = \overline{1, n}$.

As a result, analysis of the transfer characteristics FOCL determined that in the wavelength $\lambda_i = (1, 25, \dots, 166) \mu\text{m}$ range chromatic dispersion can be determined by the following functional dependence: $D_{xp}(\lambda_i) = W[L_p, \lambda_i, V_b]$. Fig. 1 shows the graphical dependence of the chromatic dispersion on the wavelength λ_i using FOC, G.652 and G.656, $\lambda_i = (1, 31, \dots, 1, 55) \mu\text{m}$.

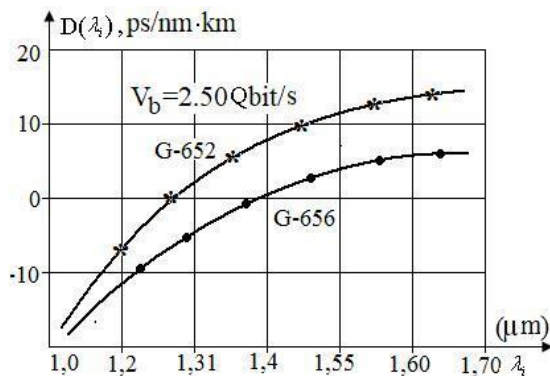


Fig. 1. Graph dependence chromatic dispersion on wavelength at given bit rate transmission optical signals

Analysis of the graphical dependence $D_{xp}(\lambda_i) = \phi[L_p, \lambda_i, V_b]$ shows that with increasing wavelength for a given parameter FOCL, the chromatic dispersion increases. Its noticeable change begins with the wavelength values $\lambda_i \geq 1, 25 \mu\text{m}$.

The relationship between the broad-band coefficient and the variance for a Gaussian pulse is described by the expression: $\Delta F(\lambda) = 0, 44 / T_b$,

$T_b = 1/V_b$, T_b – where the optical transmission signal bit period, $V_b \leq 2, 50$ Hbit/s.

In figure 2 the spectral dependence of the attenuation coefficient and dispersion on the wavelength for single-mode FOCL is presented.

It follows from the graphical dependence that when the wavelength is increased, the spectral dependence of the parameters decreases with the average bit rate of transmission of the optical signals. In addition, it can be seen from the graphical dependence that in order to match the lowest losses in the FOCL with the wavelength λ_i , dispersion FOC with a shifted dispersion are necessary.

Taking into account the duration optical radiation pulse $\tau(L_p, \lambda_i)$ in its propagation through the FOC and the relationship between the magnitude of the pulse broadening and the bandwidth of the FOC, it is approximately determined by the relation: $\Delta F_{\text{foc}}(\lambda_i) = 1 / \tau(\lambda_i, L_p)$, MHz.

So, if $\lambda_i \leq 1, 55 \mu\text{m}$, $\tau(\lambda_i) = 20$ ns, then $\Delta F_{\text{foc}}(\lambda_i) = (1 / 20\text{ns}) = 50 \cdot 10^6$ MHz.

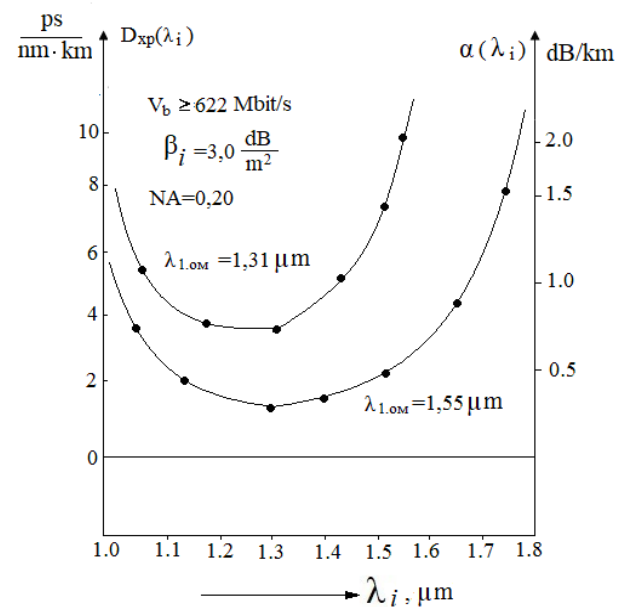


Fig. 2. The spectral dependence of the damping and dispersion coefficients from the wavelength for single-mode FOCL

Thus, based on the proposed calculation method, analytical expressions and graphical dependencies FOCL using ROM, FOC and TOM are obtained, which allow to estimate their possible transfer characteristics.

Conclusions

As a result of the FOCT study, a method for calculating FOCL transfer characteristics using the ROM, FOC and TOM indicators was proposed, to ensure the efficiency optical signals transmission and reception. It was found that low attenuation, a small dispersion of signals on the FOCL and a wide bandwidth allow the maximum permissible length of the FOC hopper with increased bandwidth.

REFERENCE

1. Ibrahimov, B.G. & Hasanov, A.H. (2017), "The investigation and evaluation multiservice network NGN/IMS for multimedia traffic", *T-Comm*, vol. 11, no.2, pp. 15-18.
2. Gordienko, V.N. (2011), Optical telecommunication systems, Hot line - Telecom, Moscow, 368 p.
3. Ibrahimov, B.G., Hasanov, M. H. & Mardanov, N.T. (2019), "Study and Analysis of Nonlinear Effects in Optical Systems Using Spectral Technologies", *Syst. of Signals Generating and Proc. in the Field of on Board Comm.*, IEEE Explore. pp. 1-4.
4. Listvyn, V.N. & Treschikov, V.N. (2015), DWDM-systems, Technosphere, Moscow, 256 p.
5. Ibrahimov, B.G., Mammadov, I.M. & Ismailova, S.R. (2012), "Investigation of the efficiency functioning of optical telecommunication networks", *Journal of Computer and Information Technology*, No 8, Moscow, pp. 3-7.
6. Portnov, E.L. (2018), Fiber optics in telecommunications, Hot line-Telecom, Moscow, 392 p.
7. Chomez, B. (2009), Planning Fiber Optic Networks, McGraw-Hill, New-York, 400 p.
8. Kaminov, I. & Li, T. (2002), Optical Fiber Telecommunication/Elsevier Science, USA, Vol. IV A, 876 p.
9. Ibrahimov, B.G. & Mammadov, I.M. (2009), "Efficiency of fiber-optic communication lines using WDM/DWDM technologies", *Proc. of the Conference "Telecommunication and Computer Systems"*, MTUCI, Moscow, pp. 179-180.
10. Agraval, G.P. (2001), Application of nonlinear fiber optic, Academic press, Moscow, 458 p.
11. Ibrahimov, B.G., Hasanov, M.Q. and Qodjaeva, Sh.F. (2018), "Research Efficiency Optical Transport Networks With Use Transferring and Reception Optoelectronics Module", *International Journal of Research - Granthaalayah*, Vol. 6, No. 2, pp. 324-330.

Received (Надійшла) 12.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.01.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Ібрагімов Байрам Ганімат огли – доктор технічних наук, професор, професор відділу ад'юнктури та науки, Військова академія Збройних Сил Азербайджанської республіки, Баку, Азербайджан;

Bayram Ganimat oğlu Ibrahimov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of department of Adjuncture and science, Military Academy of the Armed Forces of the Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan;

e-mail: i.bayram@mail.ru; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-0002-5364-1181>

Гашимов Ельшан Гіяс огли – доктор національної безпеки та військових наук, професор, професор відділу ад'юнктури та науки, Військова академія Збройних Сил Азербайджанської республіки, Баку, Азербайджан;

Elshan Gıyas oğlu Hashimov – Doctor in national security and military sciences, Professor, Professor of department of Adjuncture and science, Military Academy of the Armed Forces of the Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan;

e-mail: hasimovel@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8783-1277>

Талібов Азіз Машалла огли – доктор національної безпеки та військових наук, професор, професор відділу ад'юнктури та науки, Військова академія Збройних Сил Азербайджанської республіки, Баку, Азербайджан;

Aziz Mashalla oğlu Talibov – doctor in national security and military sciences, Professor, Professor of department of Adjuncture and science, Military Academy of the Armed Forces of the Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan;

e-mail: aziztalibov@mail.ru; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0572-7212>

Гасанов Аріф Гасан огли – доктор філософії із національної безпеки і військових наук, доцент, професор відділу ад'юнктури та науки, Військова академія Збройних Сил Азербайджанської республіки, Баку, Азербайджан;

Arif Hasan oğlu Hasanov – PhD in National security and Military Sciences, associate professor, Professor of department of Adjuncture and science, Military Academy of the Armed Forces of the Republic of Azerbaijan, Baku Azerbaijan;

e-mail: arifhasan2828@yandex.ru; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8814-1590>

Дослідження та аналіз показників волоконно-оптичних ліній зв'язку з використанням спектральних технологій

Б. Р. Ібрагімов, Е. Г. Гашимов, А. М. Талібов, А. Г. Гасанов

Анотація. Досліджено волоконно-оптичні лінії зв'язку та волоконно-оптичні системи передачі з використанням волоконно-оптичного кабелю, приймально-передаючих оптичних модулів на основі технологій WDM та DWDM (Wavelength Division Multiplexing & Dense WDM). Запропоновано метод розрахунку передавальних характеристик волоконно-оптичних ліній зв'язку та отримані залежності, що встановлюють аналітичний зв'язок між довжиною ділянки регенерації та швидкістю передачі. У цій роботі розглядається дослідження та аналіз показників волоконно-оптичних ліній зв'язку з використанням спектральних технологій WDM та DWDM.

Ключові слова: згасання у волоконно-оптичних лініях зв'язку; WDM; передатні характеристики; оптичний сигнал; DWDM.

Исследование и анализ показателей волоконно-оптических линий связи с использованием спектральных технологий

Б. Г. Ибрагимов, Э. Г. Гашимов, А. М. Талибов, А. Г. Гасанов

Аннотация. Исследованы волоконно-оптические линии связи и волоконно-оптические системы передачи с использованием волоконно-оптического кабеля, приемно-передающих оптических модулей на основе технологий WDM и DWDM (Wavelength Division Multiplexing & Dense WDM). Предложен метод расчета передаточных характеристик волоконно-оптических линий связи и получены зависимости, устанавливающие аналитическую связь между длиной участка регенерации и скоростью передачи. В данной работе рассматривается исследование и анализ показателей волоконно-оптических линий связи с использованием спектральных технологий WDM и DWDM.

Ключевые слова: затухание в волоконно-оптических линиях связи; WDM; передаточные характеристики; оптический сигнал; DWDM.

Andriy Kovalenko, Anton Poroshenko

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

ANALYSIS OF THE SOUND EVENT DETECTION METHODS AND SYSTEMS

Abstract. Detection and recognition of loud sounds and characteristic noises can significantly increase the level of safety and ensure timely response to various emergency situations. Audio event detection is the first step in recognizing audio signals in a continuous audio input stream. This article presents a number of problems that are associated with the development of sound event detection systems, such as the deviation for each environment and each sound category, overlapping audio events, unreliable training data, etc. Both methods for detecting monophonic impulsive audio event and polyphonic sound event detection methods which are used in the state-of-the-art sound event detection systems are presented. Such systems are presented in Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events (DCASE) challenges and workshops, which take place every year. Beside a majority of works focusing on the improving overall performance in terms of accuracy many other aspects have also been studied. Several systems presented at DCASE 2021 task 4 were considered, and based on their analysis, there was a conclusion about possible future for sound event detection systems. Also the actual directions in the development of modern audio analytics systems are presented, including the study and use of various architectures of neural networks, the use of several data augmentation techniques, such as universal sound separation, etc.

Keywords: sound event detection; sound event recognition; monophonic sounds; polyphonic sounds; standard deviation; median filter; dynamic threshold; sound separation.

Introduction

Various illegal actions of people, man-made accidents or natural disasters are most often preceded or accompanied by loud sounds and characteristic noises. Detection and recognition of such sounds can significantly improve safety and ensure timely response to such emergencies.

Sound event detection has become an active area of research in recent years. The main reason for this is the holding of DCASE Workshop and DCASE Challenge during the last years. So far, beside a majority of works focusing on the improving overall performance in terms of accuracy many other aspects have also been studied.

The process of recognizing an audio signal can be generally described by the sequential execution of several steps, namely, detecting the audio event in the incoming data stream, obtaining information about the distinctive features of the initial audio signal (feature extraction) and classifying the resulting features [1]. The audio signal recognition process is shown in Fig. 1.

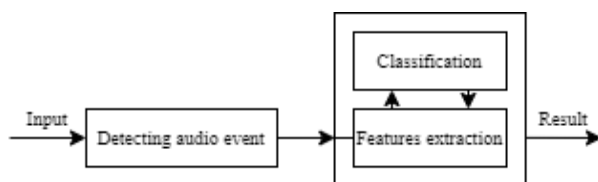


Fig. 1. The process of recognizing an audio signal

The detection task is usually much more difficult than the classification task [2]. This is primarily due to the fact that the detection task must distinguish not only the categories of events, but also the target categories of events from rich background sounds. Also, during classification, there is access to the global context of events, while in the detection task this context must first be determined, usually using unreliable local features of the audio signal.

In turn, in complex systems for detecting audio events can be used a verification of detected audio events [2]. The verification system is used to reduce the risk of an unknown audio event occurring during the classification step. After detecting an audio event, the system has access to the estimated limits of the detected event, has access to its global context, and can calculate its global features and perform verification. As a result of this approach, the inconsistency between the training and testing data is reduced, which leads to an improvement in the performance of the classifier. When using verification, the number of false positives is also reduced, since the correspondence between detection labels and classification labels is checked. The audio event detection process is shown in Fig. 2.

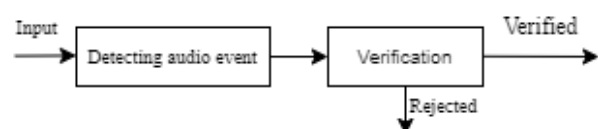


Fig. 2. The process of detection an audio signal with the verification step

Most often, systems for automatic detection and recognition of audio events are developed for specific tasks and environments [3]. There are a number of problems when using a multi-environment system and a large set of event categories. The deviation for each environment and category makes it difficult to automatically recognize audio event. Additionally, this task is complicated by the presence of overlapping audio events. Such audio events are called polyphonic. An example of polyphonic audio pods is shown in Fig. 3. Despite the fact that in real life predominantly occur polyphonic audio events, methods for detecting monophonic audio events have the right to exist, for example, in security systems for detecting gunshots.

One of the main problems of methods for detecting and classifying sound events is the problem of training data [4].

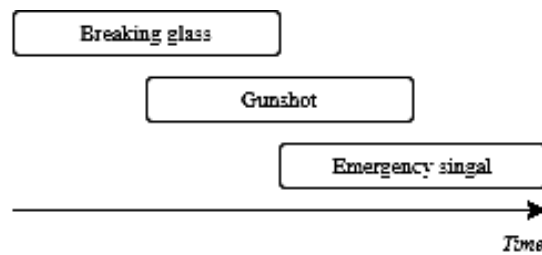


Fig. 3. Polyphonic audio events

To ensure high detection and classification accuracy, it is necessary to use a data set consisting of strictly labeled soundscapes containing time stamps for the beginning and the end of an audio event. However, such strict labeling of a sufficiently large data set is challenging, and annotations with such labels are highly likely to contain human errors and inconsistencies, especially given the ambiguity in the perception of the start and the end of some sound events. One of the solutions to this problem can be the artificial creation of soundscapes, and their designation with strict labeling [4,5]. But this can lead to a mismatch between the artificial data for training and the recorded live data that is used during the solution, which, in turn, can lead to classifier failure. Another solution to this problem can be the use of weakly labeled data that does not contain timestamps, but has information only about the presence of an event in the record [6]. However, this solution has a number of disadvantages related to the difference in the length of the audio events and the presence of background noise. This article discusses methods for sound event detection.

Section II presents the existing methodologies for detecting monophonic impulsive sounds with energy calculation for consecutive non-overlapping blocks,

Section III presents the state-of-the-art polyphonic sound event detection systems. In Section IV potential directions for the development of such systems are given.

Monophonic impulsive sound detection

Most methods for detecting monophonic impulsive audio events are based on determining the energy for a set of consecutive non-overlapping blocks [1, 7]. The various methods differ in the way in which the block corresponding to the sharp impulsive sound is automatically detected: based on the standard deviation of the normalized block energy values; based on the use of a median filter for block energy values; based on dynamic threshold for block energy values. All these methods are based on the goal of minimizing computational complexity and ensuring the highest possible detection accuracy.

The key aspect of the method based on the standard deviation of the normalized values is the normalization of the input set of energy block values to the range from zero to one. Next, the standard deviation of the resulting set of values is calculated. In the case of background noise, the energy values of the blocks will be approximately evenly distributed in the range from zero to one. Since when a new energy value for an audio signal block arrives, the values are renormalized to the

specified range, when a block with a significantly higher energy level arrives, the standard deviation value will significantly decrease compared to the same value for a set of previous background blocks. By reducing the standard deviation below the threshold value, it is possible to automatically detect a block with an impulsive signal.

The advantage of the method based on the standard deviation is its resistance to noise and the ability to detect a slowly varying signal by analyzing the average normalized value of block energies.

The next method for detecting audio events is a method based on the use of a median filter. Median filters are often used in practice for preprocessing digital data. Their properties make it possible to apply median filtering to eliminate anomalous values in data arrays, reduce outliers and impulse noise.

To detect a block with an impulse event, a conditional median filter is applied, which leaves the initial signal value if the difference between the initial sample and the median value is less than the threshold value and the median value otherwise. The result of the filtering is the filtered signal and the filtering residue, which indicates that audio event has occurred. By calculating the difference between the signal after applying the conditional median filter and the biased output signal, we can automatically select a block with an impulsive event.

The advantages of using the median filter include only its simple structure, which makes easy to release its hardware and software implementations with relatively low computational complexity. It has a number of disadvantages associated with the fact that the filter does not work in conditions of single impulsive noise, and as the filter window size increases, abrupt signal changes are blurred.

The dynamic threshold method proposes to detect a pulsed signal using the average of a set of block energies and the standard deviation as the dynamic threshold. Automatic detection occurs when the energy of the next block exceeds the threshold value.

The dynamic threshold method has the advantages of both of the past methods and avoids several of the disadvantages. But despite this, it is quite difficult to use it. This is due to the requirement to set the sensitivity parameter of the algorithm, which complicates the hardware implementation. The need to calculate the sensitivity parameter of the algorithm, taking into account the location and direction of the equipment, makes this method difficult to implement, but effective when applied correctly. The accuracy of audio event detection with decreasing signal to noise ratio is shown

in Table 1. As a data set, a set of 476 impulsive audio events is used, each with an appropriate labeling with a timestamps. All signals were digitized and sampled at 44.1 kHz.

After an audio event is detected, additional features are extracted and the detected audio event is classified by one of the known classification methods [8-10].

Table 1 – The accuracy of audio event detection with decreasing signal to noise ratio

SNR, dB	Accuracy, %		
	Standard deviation method	Median filter method	Dynamic threshold method
5	100	100	100
0	99,79	99,37	99,58
-5	97,69	97,06	97,48
-10	81,52	80,05	81,1
-15	41,81	40,34	40,55
-20	0,42	0,21	0,63

Polyphonic sound event detection

In state-of-the-art sound event detection systems, detection, verification and classification are closely linked, and they are often combined into one to ensure maximum classification accuracy. These systems are presented in Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events (DCASE) challenges and workshops, which take place every year.

For example, in DCASE2021 challenge, there is a task 4 called "Sound Event Detection and Separation in Domestic Environments". The purpose of the test is to evaluate sound event detection systems using real weakly labeled data and strictly labeled simulated data.

The task evaluates sound event detection systems that are trained on weakly labeled data that does not contain timestamps. The purpose of systems is to provide not only the class of the event, but also the localization of the event in time, given that there may be several events in an audio recording. participants are provided with isolated sound events, background sound files, and scripts for developing a training set with strictly labeled synthetic data.

The data for the DCASE 2021 task 4 consist of several datasets designed for sound event detection, such as DESED [11] (dataset with 6 subsets, 4 with recorded data and 2 with synthetic, with different annotations), SINS and TUT Acoustic scenes 2017 development dataset (background sound without annotations), FUSS and FSD50K datasets (isolated events and recorded soundscapes with weak annotations), YFCC100M dataset (recorded soundscapes without annotations).

There is a baseline solution [4], which uses a mean-teacher model based on neural networks. This model is a combination of two models with same architecture: a student model and a teacher model.

The teacher model aims at helping the student model during training, while the student model is the final model.

During training, the teacher and student models are given the same input data, but the teacher model input has additive Gaussian noise, which allows the student model to be trained using consistency loss for both strong and weak predictions for all the clips in the batch.

There is also an attempt to improve sound event detection using sound separation [12] as pre-processing to a sound event detection system.

The task of audio separation is to restore or reconstruct one or more original signals that are mixed with other signals as a result of a linear or convolutional process. This area of research has many practical applications, including sound quality improvement and noise elimination, music remixing, sound spatialization, remastering, etc. However, recent works has demonstrated that the universal sound separation can be used to separate sounds of arbitrary classes [13,14]. As it turns out, combination of sound separation and sound event detection showed the potential to improve the performance of sound event detection systems, however the benefits are still limited due to a mismatch between the sound separation training conditions and the sound event detection test conditions [12].

There are many systems for sound event detection in the DCASE 2021 task 4, which are based on the baseline system [15-20].

In 2021 challenge, system with the best ranking score proposed three major change over the baseline solution [15], namely the use of the selective kernel unit, the use of soft detection output by setting proper temperature parameter in sigmoid and the use of several data augmentation techniques. This changes allows neuron to adaptively adjust for both short- and long- duration events, and overall improves in stability and robustness of the system performance.

Second place in systems rankings [16] proposes the sound event detection model, which is based on self-training with a noisy student model. It is proposed to use an RCRNN-based mean-teacher model to predict the target label of each audio clip. Data augmentation-based feature noise, dropout-based model noise, and semi-supervised loss function based label noise were used to realize self-training,

The third place in systems rankings [17] suggests using both recurrent structure and transformer structure to model the complicated dynamics in real life domestic audio data. This was done in order to provide an overall performance boost over the baseline solution, since different models exhibit differently under the different sce-

narios. Additionally, semi-supervised mean-teacher learning and different data augmentations are used.

Discussion

The task of analyzing sound signals is inextricably linked with the entire history of human as a living organism, since it is critically important to obtain information about what is happening around us. Audio analytics systems aim to automatically extract important information from audio signals. They include such disciplines as sound scene classification or sound event detection and classification, and many others.

For further development of such systems, many problems must be overcome, for example, the deviation for each environment and each sound category, overlapping audio events, unreliable training data, etc. However, the potential inherent in audio analytics systems is incredibly high, which is confirmed by modern discoveries and state-of-the-art sound event detection systems. The current directions in the development of modern audio analytics systems are the study and use of various architectures of neural networks, the use of several data

augmentation techniques, such as universal sound separation, etc.

Conclusions

Thus, this article presents both methods for detecting monophonic impulsive audio event and polyphonic sound event detection methods which are used in the state-of-the-art sound event detection systems. Also the actual problems associated with the development of such systems are presented.

Three methods for detecting monophonic pulsed audio events have been implemented, namely the method based on the standard deviation of normalized block energies, the method based on applying a median filter for block energies, and the dynamic threshold method for block energies.

The results of their work and comparative analysis are also presented.

Several systems presented at DCASE 2021 task 4 were considered, and based on their analysis, there was a conclusion about the potential directions for the further development of audio analytics systems.

REFERENCES

1. Alain, Dufaux, Laurent, Besacier, Michael, Anson, and Fausto, Pellandini (2000), "Automatic sound detection and recognition for noisy environment", *2000 10th European Signal Processing Conference*, IEEE, pp. 1-4.
2. Phan, Huy, Koch, Philipp, Katzberg, Fabrice, Maass, Marco, Mazur, Radoslaw, McLoughlin, Ian and Mertins, Alfred (2017), "What makes audio event detection harder than classification?", *2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pp. 2739-2743, doi: <https://doi.org/10.23919/EUSIPCO.2017.8081709>.
3. Sami Ur, Rahman, Adnan, Khan, Sohail, Abbas, Fakhre, Alam and Nasir Rashid (2021), "Hybrid system for automatic detection of gunshots in indoor environment", *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 80, No. 3, pp. 4143-4153, doi: <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09936-w>.
4. Nicolas, Turpault and Romain, Serizel (2020), Training Sound Event Detection On A Heterogeneous Dataset. DCASE Workshop, Nov, Tokyo, Japan, available at: <https://arxiv.org/abs/2007.03931>.
5. J. Salamon, D. MacConnell, M. Cartwright, P. Li, and J. P. Bello (2017), "Scaper: A library for soundscape synthesis and augmentation", *Proc. WASPAA*, pp. 344-348, doi: <https://doi.org/10.1109/WASPAA.2017.8170052>.
6. A. Shah, A. Kumar, A. G. Hauptmann, and B. Raj, "A closer look at weak label learning for audio events," in arXiv:1804.09288. [Online]. available at: <http://arxiv.org/abs/1804.09288>.
7. Порошенко А.І. Методи та підходи до детектування аудіоподій різних типів [Текст] / А.І. Порошенко, А.А. Коваленко // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. Матеріали одинадцяті міжнародної НТК. – Баку: ВА ЗС АР; Харків: НТУ «ХПІ»; Київ: НАУ; Харків: ДП «ПДПРОНДІАВІАПРОМ»; Житомир: УМЖ, 2021. – 8-9 квітня 2021. – Т.2. – С. 114.
8. Порошенко, А.І. Методи класифікації ознак аудіосигналів [Текст] / А.І. Порошенко, А.А. Коваленко // Проблеми інформатизації : тези доп. 9-ї міжнар. наук.-техн. конф., 18-19 листопада 2021 р., м. Черкаси, м. Харків, м. Баку, м. Бельсько-Бяла : [у 3 т.]. Т. 1 / Черк. держ. технолог. ун-т [та ін.]. – Харків : Петров В. В., 2021. – С. 90.
9. K. Kumar and K. Chaturvedi, "An Audio Classification Approach using Feature extraction neural network classification Approach," 2nd International Conference on Data, Engineering and Applications (IDEA), 2020, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/IDEA49133.2020.9170702>.
10. K. Hirata, T. Kato and R. Oshima, "Classification of Environmental Sounds Using Convolutional Neural Network with Bispectral Analysis," 2019 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), 2019, pp. 1-2, doi: <https://doi.org/10.1109/ISPACS48206.2019.8986304>.
11. Romain Serizel, Nicolas Turpault, Ankit Shah, Justin Salamon. Sound event detection in synthetic domestic environments. ICASSP 2020 - 45th International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, May 2020, Barcelona, Spain.
12. Nicolas Turpault, Scott Wisdom, Hakan Erdogan, John Hershey, Romain Serizel, et al.. Improving Sound Event Detection In Domestic Environments Using Sound Separation. DCASE Workshop 2020 - Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events, Nov 2020, Tokyo / Virtual, Japan.
13. E. Tzinis, S. Wisdom, J. R. Hershey, A. Jansen and D. P. W. Ellis, "Improving Universal Sound Separation Using Sound Classification," ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2020, pp. 96-100, doi: <https://doi.org/10.1109/ICASSP40776.2020.9053921>.
14. S. Sose, S. Mali and S. P. Mahajan, "Sound Source Separation Using Neural Network," 2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), 2019, pp. 1-5, doi: <https://doi.org/10.1109/ICCCNT45670.2019.8944614>.
15. Zheng X., Chen H., Song Y. Zheng usc teams submission for dcase2021 task4 semi-supervised sound event detection. – DCASE2021 Challenge, Tech. Rep, 2021.
16. Kim, N. K. and Kim, H. K. (2021), "Self-training with noisy student model and semi-supervised loss function for dcase 2021 challenge task 4", available at: <http://arXiv:2107.02569>.

17. Rui, Lu, Wenzheng, Hu, Zhiyao Duan and Ji, Liu (2021), "Integrating advantages of recurrent and transformer structures for sound event detection in multiple scenarios", *Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events 2021 Workshop (DCASE2021)*, Tech. Rep., Challenge.
18. Ebberts, J. and Haeb-Umbach, R. (2021), "Self-Trained Audio Tagging and Sound Event Detection in Domestic Environments", *Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events 2021 Workshop (DCASE2021)*, Online, pp. 15-19.
19. Hyeonuk, Nam, Byeong-Yun, Ko, Gyeong-Tae, Lee, Seong-Hu, Kim, Won-Ho, Jung, Sang-Min, Choi and Yong-Hwa, Park (2021), "Heavily augmented sound event detection utilizing weak predictions", *Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events 2021 (DCASE2021)*, arXiv preprint arXiv:2107.03649.
20. Gangyi, Tian, Yuxin, Huang, Zhirong, Ye, Shuo, Ma, Xiangdong, Wang, Hong, Liu, Yueliang, Qian, Rui, Tao, Long, Yan, Kazushige, Ouchi, Janek, Ebberts and Reinhold, Haeb-Umbach (2021), "Sound event detection using metric learning and focal loss for dcase 2021 task 4", Tech. Rep., *Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events 2021 (DCASE2021)*, Challenge.

Received (Надійшла) 19.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 12.01.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

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 the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

e-mail: andriy_kovalenko@yahoo.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2817-9036>.

Порошенко Антон Ігорович – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Anton Poroshenko – postgraduate student at Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

e-mail: anton.poroshenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7266-4269>.

Аналіз методів та систем детектування аудіоподій

А. А. Коваленко, А. І. Порошенко

Анотація. Виявлення та розпізнавання гучних звуків і характерних шумів дозволяє значно підвищити рівень безпеки та забезпечити своєчасне реагування на різні аварійні ситуації. Детектування аудіоподій – це перший крок у розпізнаванні аудіосигналів з безперервним входним аудіопотоком. У даній статті представлено ряд проблем, пов'язаних з розробкою систем виявлення аудіоподій, таких як відхилення для кожного середовища і кожної звукової категорії, звукові події, що перекриваються, недостовірні навчальні дані та ін. Представлені як методи виявлення монофонічних імпульсних звукових подій, так і методи виявлення поліфонічних аудіоподій, які використовуються в сучасних системах виявлення звукових подій. Такі системи представлені у завданнях та семінарах Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events (DCASE), які відбуваються щороку. Більшість робіт спрямовані на покращення загальної продуктивності з точки зору точності, хоча також були вивчені багато інших аспектів. Було розглянуто кілька систем, представлених на DCASE 2021 в задачі 4, і на основі їх аналізу був зроблений висновок про можливе майбутнє систем виявлення звукових подій. Також представлені актуальні напрямки розвитку сучасних систем аудіоаналітики, в тому числі вивчення та використання різних архітектур нейронних мереж, використання декількох методів попередньої обробки даних, таких як універсальний розділ звуку та ін.

Ключові слова: виявлення звукових подій; розпізнавання звукових подій; монофонічні звуки; поліфонічні звуки; середньоквадратичне відхилення; медіанний фільтр; динамічний поріг; звуковий поділ.

Анализ методов и систем обнаружения аудиособытий

А. А. Коваленко, А. И. Порошенко

Аннотация. Обнаружение и распознавание громких звуков и характерных шумов позволяет значительно повысить уровень безопасности и обеспечить своевременное реагирование на различные аварийные ситуации. Обнаружение аудиособытий — это первый шаг в распознавании аудиосигналов с непрерывным входным аудиопотоком. В данной статье представлен ряд проблем, связанных с разработкой систем обнаружения звуковых событий, таких как отклонения для каждой среды и каждой звуковой категории, перекрывающиеся звуковые события, недостоверные обучающие данные и т. д. Представлены как методы обнаружения монофонических импульсных звуковых событий, так и методы обнаружения полифонических звуковых событий, которые используются в современных системах обнаружения звуковых событий. Такие системы представлены в задачах и семинарах Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events (DCASE), которые проходят каждый год. Большинство работ направлены на улучшение общей производительности с точки зрения точности, хотя также были изучены и многие другие аспекты. Было рассмотрено несколько систем, представленных на DCASE 2021 в задаче 4, и на основе их анализа был сделан вывод о возможном будущем систем обнаружения звуковых событий. Также представлены актуальные направления развития современных систем аудиоаналитики, в том числе изучение и использование различных архитектур нейронных сетей, использование нескольких методов предварительной обработки данных, таких как универсальное разделение звука и др.

Ключевые слова: обнаружение звуковых событий; распознавание звуковых событий; монофонические звуки; полифонические звуки; средноквадратичное отклонение; медианный фильтр; динамический порог; звуковое разделение.

Lev Raskin, Iaroslav Sviatkin, Yuriy Ivanchikhin, Roman Korsun

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

SEMI-MARKOV RELIABILITY MODELS

Abstract. Traditional technologies for reliability analysis of semi-Markov systems are limited to obtaining a stationary state probability distribution. However, when solving practical control problems in such systems, the study of transient processes is of considerable interest. This implies the subject of research - the analysis of the laws of distribution of the system states probabilities. The goal of the work is to obtain the desired distribution at any time. The complexity of the problem solving is determined by the need to obtain a result for arbitrary distribution laws of the duration of the system's stay in each state before leaving. An easy-to-implement method for the analysis of semi-Markov reliability models has been suggested. The method is based on the possibility of approximating probability-theoretic descriptions of failure and recovery flows in the system using the Erlang distribution laws of the proper order. The developed computational scheme uses the most important property of Erlang flows, which are formed as a result of sieving the simplest Poisson flow. In this case, the semi-Markov model is reduced to the Markov one, which radically simplifies the analysis of real systems.

Keywords: semi-Markov reliability models; approximation by Erlang distributions of the proper sequence.

Introduction

The elementary model of the system in the reliability theory definitions [1-3] is described as follows. The system can be in one out of two states during its functioning procedure:

E_0 means the system is functioning normally,

E_1 means the system failed and is being recovered.

Recovery failure procedures are random. To describe them, let's introduce the following:

$f_{01}(t)$ is the distribution density of the random duration of the system's stay in the state E_0 prior to entering the state E_1 ;

$f_{10}(t)$ is the distribution density of the random duration of the system's stay in the state E_1 prior to entering the state E_0 ;

$H_{00}(t)$ is the conditional probability that the system at time point t would be in the state E_0 , unless it was in the state E_0 at the initial point;

$H_{01}(t)$ is the conditional probability that the system at time point t would be in the state E_0 , unless it was in the state E_0 at the initial point;

$H_{01}(t)$ is the conditional probability that the system at time point t would be in the state E_1 , unless it was in the state E_0 at the initial point;

$H_{10}(t)$ is the conditional probability that the system at time point t would be in the state E_0 , unless it was in the state E_1 at the initial point;

$H_{11}(t)$ is the conditional probability that the system at time point t would be in the state E_1 , unless it was in the state E_1 at the initial point.

A set of relations are obtained describing the possible dynamics of the system states.

Let $E=(E_i)$, $i=1,2,...,n$ be the set of possible system states.

A system that was in the state i at the initial point can be in the state j at point t as follows. Firstly, unless $j=i$, the system may not leave the state i until the point t , or exit this state and go back thereto by the point t . The related mathematical model is as follows:

$$G_{ij}(t) = \gamma_i(t) + \sum_{k \in E, k \neq i} P_{ik} \int_0^t f_{ik}(\tau) G_{ki}(t-\tau) d\tau. \quad (1)$$

Secondly, unless $j \neq i$, the system may find itself in this state, passing to certain intermediate state k at some point $\tau < t$. Herewith

$$G_{ij}(t) = \gamma_i(t) + \sum_{k \in E, k \neq i} P_{ik} \int_0^t f_{ik}(\tau) G_{kj}(t-\tau) d\tau. \quad (2)$$

Here P_{ik} is the probability of the system transition from the state i to the state j .

In the considered reliability theory problem, when $E = (E_0, E_1)$, the ratios (1), (2) are simplified.

$$H_{00}(t) = (1 - \int_0^t f_{01}(\tau) d\tau) + \int_0^t f_{01}(\tau) H_{10}(t-\tau) d\tau. \quad (3)$$

$$H_{01}(t) = \int_0^t f_{01}(\tau) H_{11}(t-\tau) d\tau. \quad (4)$$

$$H_{10}(t) = \int_0^t f_{10}(\tau) H_{00}(t-\tau) d\tau. \quad (5)$$

$$H_{11}(t) = (1 - \int_0^t f_{10}(\tau) d\tau) + \int_0^t f_{10}(\tau) H_{01}(t-\tau) d\tau. \quad (6)$$

The resulting system of integral equations (3)-(6) is solved using Laplace transformations. As it is known, the Laplace transformation of the function $u(t)$ is a function

$$L(u(t)) = \int_0^\infty u(t) e^{-st} dt = \frac{1}{s} L(u(t)) = \frac{1}{s} u^*(s). \quad (7)$$

Applying the transformation (7) to the ratios (3)-(6), their Laplace image is obtained:

$$H_{00}^*(s) = \frac{1}{s} (1 - f_{01}^*(s)) + f_{01}^*(s) H_{10}^*(s), \quad (8)$$

$$H_{01}^*(s) = f_{01}^*(s) H_{11}^*(s), \quad (9)$$

$$H_{10}^*(s) = f_{10}^*(s) H_{00}^*(s), \quad (10)$$

$$H_{11}^*(s) = \frac{1}{s} (1 - f_{10}^*(s)) + f_{10}^*(s) H_{01}^*(s). \quad (11)$$

The resulting equations must be solved by expressing the unknown functions $H^*_{00}(s)$, $H^*_{01}(s)$, $H^*_{10}(s)$, $H^*_{11}(s)$ through Laplace images of known densities $f_{01}(t)$, $f_{10}(t)$.

Applying the relations (10) to (8), the following is obtained

$$H^*_{00}(s) = \frac{1}{s}(1 - f^*_{01}(s)) + f^*_{01}(s)f^*_{10}(s)H^*_{00}(s),$$

where from

$$H^*_{00}(s)(1 - f^*_{01}(s)f^*_{10}(s)) = \frac{1}{s}(1 - f^*_{01}(s)),$$

$$H^*_{00}(s) = \frac{1}{s} \frac{1 - f^*_{01}(s)}{1 - f^*_{01}(s)f^*_{10}(s)}. \quad (12)$$

Similarly, the following is obtained

$$H^*_{10}(s) = \frac{1}{s} \frac{(1 - f^*_{01}(s))f^*_{10}(s)}{1 - f^*_{01}(s)f^*_{10}(s)}, \quad (13)$$

$$H^*_{11}(s) = \frac{1}{s} \frac{1 - f^*_{10}(s)}{1 - f^*_{01}(s)f^*_{10}(s)}, \quad (14)$$

$$H^*_{10}(s) = \frac{1}{s} \frac{(1 - f^*_{10}(s))f^*_{01}(s)}{1 - f^*_{01}(s)f^*_{10}(s)}, \quad (15)$$

Thus, the solution of the system reliability analysis problem is reduced to the following two-stage procedure. One should obtain the Laplace images $f_{01}(s)$, $f_{10}(s)$ of the known densities $f_{01}(t)$, $f_{10}(t)$ at the first stage. The desired functions $H^*_{00}(t)$, $H^*_{01}(t)$, $H^*_{10}(t)$, $H^*_{11}(t)$ describing the dynamics of the system states are processed using the inverse Laplace transformation at the second stage.

Let's represent the results of solving this problem for a textbook instance when the system is considered Markov. Here with

$$f^*_{01}(t) = \frac{\lambda}{s + \lambda}, \quad f^*_{10}(t) = \frac{\mu}{s + \mu}$$

Then
$$H^*_{00}(s) = \frac{s + \mu}{s(s + \lambda + \mu)}, \quad (16)$$

$$H^*_{10}(s) = \frac{\mu}{s(s + \lambda + \mu)}, \quad (17)$$

$$H^*_{11}(s) = \frac{s + \lambda}{s(s + \lambda + \mu)}, \quad (18)$$

$$H^*_{01}(s) = \frac{\lambda}{s(s + \lambda + \mu)}, \quad (19)$$

The inverse transformations of the obtained Laplace images are tabular and are as follows:

$$H_{00}(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}, \quad (20)$$

$$H_{10}(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}, \quad (21)$$

$$H_{11}(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}, \quad (22)$$

$$H_{01}(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}. \quad (23)$$

The ratios (20)-(23) represent the solution to the problem of the system recovery analysis, containing comprehensive information about its state at any time point. Herewith, as expected, $H_{00}(s) + H_{01}(s) = 1$, $H_{10}(s) + H_{11}(s) = 1$.

So, the described computational procedure successfully solves the given problem. However, it should be noted that this approach has a fundamental drawback, which is as follows. This solution in almost all cases is a set of functions with numerical coefficients, whose values are not related to the values of the system parameters. That is, a point estimate of the system state for any given set of source data is provided. In addition, it is much more important to explicitly obtain the dependencies of the resulting estimates of the system functioning quality on the numerical values of its parameters for the actual practice of the system operation. Only in this case, the system analysis problem can be considered solved completely, since only in this event it becomes possible to develop any recommendations to improve the system efficiency, i.e., to solve the structural and parametric optimization problems.

Thus, the problem of searching for the method of in-depth analysis of semi-Markov systems, focused on obtaining the resulted analytical relations, as well as an explicit dependence of the probability distributions of the system states on the values of its parameters appears relevant. A possible direction of searching for an approximate solution to the problem is as follows. The space of values and parameters of the system accumulates a set of points generating an orthogonal plan. The problem is solved by a known numerical method for each point. Standard statistical processing of results of such a multifactorial orthogonal experiment in terms of the system parameters number that specify the dynamics of its functioning makes it possible to obtain the desired relations. This approach is reliable, though its constructive drawback is evident, that is the related computational procedure is knowingly cumbersome. Herewith, the complexity level of its implementation depends in an unpredictable way on the level of required accuracy of solving the problem.

Literature data analysis

The generated problem of analyzing semi-Markov systems is being actively discussed. In [1-3], a general approach to solving the problem is suggested, which reduces to solving the integral equations system. Herewith, the attention is drawn to the complexity of its implementation for many practical situations. In view of this circumstance, the general problem in a very large number of works is simplified. In [4], the problem of evaluating the queuing system efficiency along with a semi-Markov incoming flow was considered. It resulted in obtaining the probability distribution of its states. In

[5], a stationary probability distribution for the semi-Markov model of production system was also obtained. The same result was obtained in [6] for a set of computer network analysis problems. Similar research results are given in [7-13] for various options of descriptions of failure and recovery flows. A summary of well-known publications on the issue of the semi-Markov systems analysis allows for the following conclusion. For an extensive class of problems in the study of semi-Markov systems, there is no simple and convenient method for analyzing the dynamics of states of such systems for the purpose of practical implementation. This circumstance determines the issue relevance and the study purpose.

3. The **study objective** is to develop a fast approximate method of analyzing semi-Markov systems along with the controlled accuracy of the result.

4. The basic result. Method of analyzing semi-Markov models.

To solve the problem of analyzing semi-Markov systems, an approach based on a special approximation of real processes within the system is suggested. Such an approximation should meet the following requirements. Firstly, its implementing functions must be parameterized, i.e., proper selection of their parameters allows ensuring the required accuracy of descriptions of real processes within the system. Secondly, the approximating functions should allow for the simplicity of performing the direct and reverse Laplace transformations.

It is convenient to select the Erlang distribution laws of the required sequence as such functions. The related functions possess the following number of important benefits:

- they are positive for $[0, \infty]$ and integrable;
- changing the parameters of the Erlang distribution density allows changing the mathematical expectation, variance, asymmetry and kurtosis of the related random variable within a wide range.

However, the decisive benefit of Erlang distributions is that the events flow described by this distribution is a screened Poisson flow. In particular, unless the Poisson flow of events is screened, by selecting each n th event therefrom, then the random interval between these events shall be described by an Erlang distribution of the sequence n . The most important property of the Erlang flow to be generated by the Poisson flow allows it to be constructively used to analyze the semi-Markov models practically regardless of the type of probability distributions of the real system. The related technique is two-stage.

The distributions describing the incoming failure and recovery flow of the real system are independently approximated by Erlang distributions of the proper sequence at the first stage. Herewith, histograms of the related random variables are generated in a standard way by previous processing the source data on the duration of the system's stay in a state of normal functioning prior to the failure and the duration of recovery. These histograms are used to assess the approximation parameters of Erlang distributions via the max verisimilitude method.

The obtained pair of Erlang distributions is applied to construct the Markov approximation of a real semi-Markov system at the second stage as follows.

Let the input of the analyzed system (E_0, E_1) receives an Erlang flow of the sequence n_1 with the distribution density of the interval between failures $f_{01}(t) = \lambda^n t^{n-1} e^{-\lambda t}$, and the service sequence is an Erlang flow of the sequence m $f_{10}(t) = \mu^m t^{m-1} e^{-\mu t}$. This diagram is schematically shown in Fig. 1.

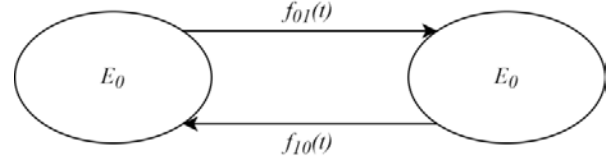


Fig. 1. System functioning diagram

Let us consider the technology of analyzing such a semi-Markov system that does not require solving an integral equations system.

Let the distribution law of the duration of the system's stay in the state i prior to the transition to the state j be given as follows: $E_{ij}(t) = P(\tau_{ij} \leq t)$. Here τ_{ij} is the random duration of stay at i prior to transition into j . Then $Q_{ij}(t) = P(\tau_{ij} > t) = 1 - F_{ij}(t)$ is the probability that the transition from i to j at the interval $[0, t]$ did not occur.

Now let's introduce

$F_{ij}(t+\tau) = P(\tau_{ij} \leq t+\tau)$ is the probability that the transition occurred at the interval $[0, t+\tau]$;

$Q_{ij}(t+\tau) = P(\tau_{ij} > t+\tau) = 1 - F_{ij}(t+\tau)$ is the probability that the transition from i to j at the interval $[0, t+\tau]$ did not occur;

$Q_{ij}(t, t+\tau)$ is the probability that the transition from i to j at the interval $[t, t+\tau]$ did not occur.

It is clear that

$$Q_{ij}(t+\tau) = Q_{ij}(t)Q_{ij}(t, t+\tau), \quad (24)$$

$$\text{where from} \quad Q_{ij}(t, t+\tau) = \frac{Q_{ij}(t+\tau)}{Q_{ij}(t)}. \quad (25)$$

Later one shall introduce the probability of transition from i to j at the interval $[t, t+\tau]$.

$$\begin{aligned} w_{ij}(t, t+\tau) &= 1 - Q_{ij}(t, t+\tau) = \\ &= 1 - \frac{Q_{ij}(t+\tau)}{Q_{ij}(t)} = \frac{Q_{ij}(t) - Q_{ij}(t+\tau)}{Q_{ij}(t)} = \\ &= \frac{(1 - F_{ij}(t)) - (1 - F_{ij}(t+\tau))}{1 - F_{ij}(t)} = \frac{F_{ij}(t+\tau) - F_{ij}(t)}{1 - F_{ij}(t)}. \end{aligned} \quad (26)$$

Now let's consider the value

$$\begin{aligned} \lambda_{ij}(t) &= \frac{dw_{ij}(t, t)}{d\tau} = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{w_{ij}(t, t+\tau)}{\tau} = \\ &= \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{F_{ij}(t+\tau) - F_{ij}(t)}{\tau(1 - F_{ij}(t))} = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{F_{ij}(t+\tau) - F_{ij}(t)}{\tau} \times \\ &\times \frac{1}{1 - F_{ij}(t)} = \frac{1}{1 - F_{ij}(t)} \frac{dF_{ij}(t)}{dt} = \frac{f_{ij}(t)}{1 - F_{ij}(t)}, \end{aligned} \quad (27)$$

where $f_{ij}(t) = \frac{dF_{ij}(t)}{dt}$ is the distribution density of the random variable τ .

The function $\lambda_{ij}(t)$ introduced according to (27) defines the transition intensity. It follows from relation (3) that this transition intensity can be defined as the conditional probability density of transitions at time point t , provided that no transition has occurred till this point. This general approach to assess the transition intensity is inconvenient, since the transition intensity value obtained according to (27) is a function of time. In addition, when solving practical problems, it is important to know the mean value of transitions intensity. This value is easily and regularly obtained as follows. For a given density distribution $f_{ij}(t)$ of the duration of stay at i prior to leaving for j , let us calculate

the mean value of this duration: $\bar{\tau}_{ij}(t) = \int_0^{\infty} t f_{ij}(t) dt$.

Let's set the intensity $\lambda_{ij}(t)$ of the transition from i to j by an Erlang distribution of sequence n , that is

$$f_n(t) = \frac{\lambda(\lambda t)^{n-1}}{(n-1)!} e^{-\lambda t}. \text{ Here with}$$

$$\bar{\tau}_{ij}(t) = \int_0^{\infty} t f_{ij}(t) dt = \int_0^{\infty} \frac{(\lambda t)^n}{(n-1)!} e^{-\lambda t} dt = \frac{\lambda^n}{(n-1)!} \int_0^{\infty} t^n e^{-\lambda t} dt.$$

$$\text{Since } \int_0^{\infty} t^n e^{-\lambda t} dt = \frac{n!}{\lambda^{n+1}},$$

$$\text{then } \bar{\tau}_{ij}(t) = \frac{\lambda^n}{(n-1)!} \int_0^{\infty} t^n e^{-\lambda t} dt = \frac{\lambda^n}{(n-1)!} \frac{n!}{\lambda^{n+1}} = \frac{n}{\lambda}.$$

Then the related intensity of the transition from i to j shall be equal to

$$\lambda_{ij}(t) = 1/\bar{\tau}_{ij} = n/\lambda.$$

The obtained relation is quite consistent with the concept of an Erlang flow of sequence n , as a screened simplest flow wherefrom every n th event is extracted. It is clear that the intensity of the obtained extracted flow in this case is n times less than the intensity of the source flow. Let's go back to the formulated problem.

So, the incoming flow and the queuing flow are described respectively by Erlang distributions of sequences n_1 and n_2 . Then the equivalent diagram describing the processes of such system functioning is as shown in Fig. 2.

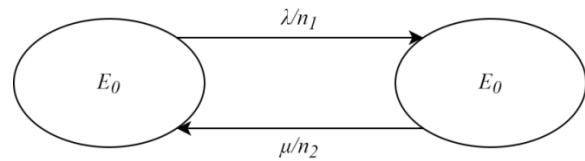


Fig. 2. Graph of states and transitions within the system

The final probability distribution of states within the system is known to be as follows:

$$P_0 = \frac{\mu/n_1}{\lambda/n_1 + \mu/n_2} = \frac{\mu}{\lambda \cdot n_2/n_1 + \mu} = \frac{n_1 \mu}{n_2 \lambda + n_1 \mu},$$

$$P_1 = \frac{\lambda/n_1}{\lambda/n_1 + \mu/n_2} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu \cdot n_1/n_2} = \frac{n_2 \lambda}{n_2 \lambda + n_1 \mu}.$$

Thus, the suggested technique allows to analyze single-channel semi-Markov systems, for which a satisfactory quality approximation of the incoming flow of requirements and the flow of their queuing by Erlang distributions of the appropriate sequence is obtained. The spread of the promising concept of representing models of real systems by the Erlang approximations allows applying effective technologies of state phase aggregation [14]. In addition, it should be noted, that the suggested approach can be used to study multi-threaded queuing systems with differences in priorities defined by the pairwise comparisons method [15].

Conclusions

An easy-to-implement method for approximating models for semi-Markov systems has been suggested. The computational efficiency of the method is defined by the following principal features of the analyzed systems. Firstly, there is a possibility of using the Erlang approximations to describe probability distributions that define the processes of system dynamics. Secondly, the simplicity of the obtained ratios allows to solve both the problems of analyzing the system reliability, and also the problems of their structural and parametric optimization.

REFERENCES

1. Gnedenko, B.V., Belyaev, Yu. K. and Solovyev, A. D. (1965), *Mathematical methods in the reliability theory*, Science, Moscow, 524 p.
2. Barzilovich, E. Yu., Belyaev, Yu. K., Kashtanov, V. A., Kovalenko, I. N., Solovyev, A. D. and Ushakov, I. A. (1983), *Matters of mathematical reliability theory*, Radio and communications, Moscow, 376 p.
3. Korolyuk, V. S. and Turbin, A. F. (1976), *Semi-Markov processes and their application*, Science concept, Kyiv, 172 p.
4. Feinberg, E. A. and Yang, F. (2016), "Optimal pricing for a G1/M/K/N queue with several customer types and holding costs", *Queuing systems*, vol. 82, pp. 103-120.
5. Cao, X. R. (2015), "Optimization of average rewards of time non humongous smarkov chains", *Trans. On Automatic control*, vol. 60, no. 7, pp. 1841-1856.
6. Li, Q. (2016), "Nonlinear markov processes in big networks", *Special matrices*, vol. 4, no. 1, pp. 202-217.
7. Zhong Kai-Lai (1954), *Homogeneous Markov chains*, World, Moscow, 264 p.
8. Borisovich, A. V. and Dyakin, N. V. (2015), "A semi-Markov model for assessing the reliability indicators of an uninterruptible power supply of a data center", *Modern Scientific. Innov.*, no. 8, pp. 68-74.
9. Sorokin, A. S. (2005), "Application of semi-Markov processes to the determination of reliability performance of process diagrams", *Bulletin of KSU*, no. 2, pp. 3-7.

10. Anishchenko, V. V. (2020), "Semi-Markov reliability models", *Computer science*, vol. 17, no. 4, pp. 24-32.
11. Kazhak, V., Stenkin, V. and Zakharov, A. (2019), "Statistical semi-Markov model for assessing the reliability indicators of electromechanical systems", *System technologies*, vol. 2(121), pp. 114-119.
12. Limnios, N. (2001), *Semi-markov processes and reliability*, Birkhauser, Boston, 214 p.
13. Kashtanov, V. A. and Medvedev, A. I. (2002), *Complex systems reliability theory*, European Center, Moscow, p. 196.
14. Raskin, L.G. (1997), "Markov chains analysis using phase enlargement of states", *Science, technology, equipment, education, health*, NTU KhPI, p. 28.
15. Raskin, L.G. and Seraya, O.V. (2003), "Formation of a scalar preference criterion based on the results of pair-wise comparisons", *Bulletin of NTU KhPI*, No. 6, pp. 63-68.

Received (Надійшла) 10.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.02.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Раскін Лев Григорович – доктор технічних наук, професор, кафедри інтернету речей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Lev Raskin – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Internet of Things Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: topology@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9015-4016>.

Святкін Ярослав Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інтернету речей, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, Україна;

Iaroslav Sviatkin – PhD, Associate Professor of the Internet of Things Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: yariks@i.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6828-6699>.

Іванчихін Юрій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інтернету речей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Yuriy Ivanchikhin – PhD, Associate Professor of the Internet of Things Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

Email: iwanywed@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3999-6541>

Корсун Роман Олегович – аспірант кафедри інтернету речей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Roman Korsun – postgraduate student of the Internet of Things Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: roman.korsun7@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1950-4263>.

Напівмарківські моделі надійності

Л. Г. Раскін, Я. В. Святкін, Ю. В. Иванчихин, Р. О. Корсун

Анотація. Традиційні технології аналізу надійності напівмарківських систем обмежуються одержанням стаціонарного розподілу ймовірностей станів. Проте, під час вирішення практичних завдань управління у таких системах значний інтерес має дослідження перехідних процесів. Звідси впливає предмет дослідження – аналіз законів розподілу ймовірностей станів системи. Метою роботи є отримання розподілу на будь-який момент часу. Складність розв'язання поставленого завдання визначається необхідністю отримання результату для довільних законів розподілу тривалості перебування системи в кожному стані до догляду. Запропоновано простий у реалізації метод аналізу напівмарківських моделей надійності. Метод заснований на можливості апроксимації теоретико-імовірнісних описів потоків відмов та відновлення в системі за допомогою законів розподілу Ерланга належного порядку. Розроблена обчислювальна схема використовує найважливішу властивість потоків Ерланга, що формуються в результаті просіювання найпростішого пуассонівського потоку. При цьому напівмарківська модель редукується до марківської, що радикально полегшує процедуру аналізу реальних систем.

Ключові слова: напівмарківські моделі надійності; апроксимація розподілами Ерланга належного порядку.

Полумарковские модели надежности

Л. Г. Раскин, Я. В. Святкин, Ю. В. Иванчихин, Р. О. Корсун

Аннотация. Традиционные технологии анализа надежности полумарковских систем ограничиваются получением стационарного распределения вероятностей состояний. Однако, при решении практических задач управления в таких системах значительный интерес имеет исследование переходных процессов. Отсюда следует предмет исследования – анализ законов распределения вероятностей состояний системы. Целью работы является получение искомого распределения на любой момент времени. Сложность решения поставленной задачи определяется необходимостью получения результата для произвольных законов распределения продолжительности пребывания системы в каждом из состояний до ухода. Предложен простой в реализации метод анализа полумарковских моделей надежности. Метод основан на возможности аппроксимации теоретико-вероятностных описаний потоков отказов и восстановления в системе с помощью законов распределения Эрланга надлежащего порядка. Разработанная вычислительная схема использует важнейшее свойство потоков Эрланга, формирующихся в результате просеивания простейшего пуассоновского потока. При этом полумарковская модель редуцируется к марковской, что радикально упрощает процедуру анализа реальных систем.

Ключевые слова: полумарковские модели надежности; аппроксимация распределениями Эрланга надлежащего порядка.

Elena Tverytnykova, Tatyana Drozdova, Yulia Demidova, Nataliia Kuzmenko

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

METROLOGICAL SUPPORT OF PULSE OXIMETERS

Abstract. The experience of the International Medical Device Regulators Forum in the use of products for oxygen therapy based on the study of guidelines, international and European regulations on medical devices is considered. Emphasis is placed on issues related to the metrological support of pulse oximeters. The global situation with the pandemic increases the relevance of selected topics. Continuous monitoring of blood oxygen saturation is one of the most important elements in the diagnosis and treatment of COVID-19. Despite the fact that the use of pulse oximeters does not require special medical knowledge, calibration and special maintenance, it is still necessary to control their reliability and accuracy of measurement. The study of pulse oximeter MD300M in accordance with the requirements of DSTU 8893:2019 "Metrology. Pulse oximeters. Calibration Method" 2020. Analysis of MD300M pulse oximeter calibration results revealed that this pulse oximeter was calibrated by the saturation and pulse measurement channel, as the maximum deviation of the measured saturation value from the pulse oximeter calibration measure does not exceed the pulse oximeter measurement documentation specified in the operating documentation. The discreteness of the MD300M pulse oximeter and the discreteness of the reference device MPPO-2, which are specified in the passports for the respective devices, have the greatest influence on the measurement uncertainty.

Keywords: metrological support; pulse oximeter; COVID-19; verification; international standards.

Introduction

Pulse oximetry as a medical technology appeared thirty years ago. More than fifteen years ago, pulse oximeters have been introduced into a wide range of clinical practice. Today, due to the spread of the coronavirus pandemic, this portable medical device is at its first stage of gaining popularity and is becoming an integral part of both specialized medical institutions and everyday life. The global situation with the pandemic increases the relevance of selected topics. Despite the efforts of scientists in many countries – a cure for the disease has not yet been invented and the fight against symptoms comes to the fore. Pulse oximetry is a non-invasive method of measuring two parameters: blood oxygen saturation and heart rate, which are most important during anesthesia, intensive care, resuscitation, and coronavirus disease. Continuous monitoring of blood oxygen saturation is a special metric element in the diagnosis and treatment of COVID-19. Despite the fact that the use of pulse oximeters does not require special medical knowledge, calibration and special maintenance, it is still necessary to control their reliability and accuracy of measurement.

Many publications have been devoted to the study of various problems related to the development and use of pulse oximeters. This is a study of choosing the most optimal location of the pulse oximeter sensor, which was conducted on 20 respondents. Based on the results obtained, the authors issued specific recommendations for the use of portable devices [1]. Different designs of portable pulse oximeters are presented in publications [2–3]. An interesting study was conducted in 29 hospitals in the UK [4] based on the involvement of 847 pulse oximeters of different types and different manufacturers. Significant shortcomings in the construction of the electrical circuit have been invented, which has a significant impact on the accuracy of measurements. It was found that 30.5% of the total number of devices did not meet the manufacturer's specifications. In addition, there is no system of periodic calibration of devices. Evaluation of the pulse oximeter

based on the methodology of the international standard ISO 80601-2-61: 2011 is presented in [5]. Based on the results of experimental studies, it is proved that the proposed device meets the requirements of the standard. The issue of reliability and accuracy is covered in the study [6]. The authors touched on the important problem of measuring the accuracy of special pulse oximeters, which are designed for very young children and children with disabilities. Various issues of metrological support and reliability of heart rate monitor measurements have been studied in [8–12]. In particular, in the publication [9] the authors proposed a scheme for calibration of pulse oximeters and two variants of devices for its implementation. An analysis of the scientific literature on the identified problem suggests that there is no separate study on the metrological support of pulse oximeters and the state of the regulatory framework for the use of these medical devices in Ukraine.

The purpose of the article is to analyze the current regulatory framework of Ukraine in the field of medical devices and study the metrological support of the pulse oximeter based on the involvement of DSTU 8893:2019 "Metrology. Pulse oximeters. Calibration method" 2020.

Presentation of the main material

According to the purpose, pulse oximeters are divided into autonomous (compact, mounted directly on the finger), portable (device with display, signal cable and sensor for various purposes) and stationary (designed for long-term monitoring of various physiological parameters). Pulse oximeters are used both for a single test, that is one measurement of SpO₂, and for long-term monitoring of SpO₂ levels. Established in 2011, the International Medical Device Regulators Forum (IMDRF) has developed a number of documents aimed at establishing global cooperation in international trade, harmonizing activities in the field of safety, efficiency and quality of medical devices. Within the IMDRF there is a special group for the harmonization of medical devices. The IMDRF includes the following countries: Japan, the Russian Federation,

the United States, Australia, Brazil, Canada, China and the European Union. There are also branches of the Asian Harmonization Group and the Pan American Health Organization. IMDRF has created a number of guidelines that summarize the different approaches to the use of pulse oximeters. Technical specifications,

instructions for use of products for oxygen therapy are given [13–17]. International legal documents, as well as documents of IMDRF member countries and Ukraine, applicable to the manufacturer, production technology and conditions of use of medical devices, including pulse oximeters, are summarized in table 1.

Table 1 – Regulatory documents applicable to pulse oximeters [13–19]

Level	Regulatory documents
International	ISO 13485 Medical devices – Quality management systems – Requirements for regulatory purposes
	ISO 14971 Medical devices – Application of risk management to medical devices
	ISO 80601-2-61 Medical electrical equipment. Part 2-61: Specific requirements for basic safety and essential performance of pulse oximeter equipment
	IEC 80001-5-1 Health software and health IT systems safety, effectiveness and security. Part 5-1: Security – Activities in the product life cycle
	IEC 60601-1 Medical electrical equipment. Part 1: General requirements for basic safety and essential performance
	IEC 60601-1-1 Medical electrical equipment. Part 1-1: General requirements for safety – Collateral standard: Safety requirements for medical electrical systems
	IEC 60601-1-2 Medical electrical equipment - Part 1-2: General requirements for basic safety and essential performance – Collateral Standard: Electromagnetic disturbances – Requirements and tests
	IEC 60068-2-31 Environmental testing: Part 2-31: Tests. Test Ec: Rough handling shocks, primarily for equipment type specimens
	IEC 62366-1 Medical devices - Part 1: Application of usability engineering to medical devices
	IEC 62133 Secondary cells and batteries containing alkaline or other nonacid electrolytes. - Safety requirements for portable sealed secondary cells. Part 1: Nickel systems, Part 2: Lithium systems
	ISO/IEEE 11073-10404 Health informatics. Personal health device communication. Part 10404: Device specialization. Pulse oximeter
	21 CFR Part 820 – QUALITY SYSTEM REGULATION (USA)
Regional	21 CFR § 868.5440 – Portable oxygen generator (USA)
	MHLW Ministerial Ordinance No. 169 (2004) (Japan)
	Regulation (EU) 2017/745
	Ukraine
	DSTU EN ISO 13485:2018 (EN ISO 13485:2016+ EN ISO 13485:2016 / AC:2016, IDT) Medical devices – Quality management systems – Requirements for regulatory purposes
	DSTU EN ISO 14971:2015 Medical devices. Application of risk management to medical devices (EN ISO 14971:2012, IDT; ISO 14971:2007, IDT)
	DSTU EN ISO 11607-1:2015 (EN ISO 11607-1:2009, IDT; ISO 11607- 1:2006, IDT). Packaging for terminally sterilized medical devices – Part 1: Requirements for materials, sterile barrier systems and packaging systems
	DSTU EN ISO 11607-2:2015 (EN ISO 11607-2:2006, IDT; ISO 11607- 2:2006, IDT) Packaging for terminally sterilized medical devices – Part 2: Validation requirements for forming, sealing and assembly processes
	Technical regulations for medical tests, approved by the decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 753 dated 02.10.2013.

The analysis of normative-legal documentation allowed to establish that a number of normative documents in the field of medical devices have been developed in Ukraine. According to the resolution of the Cabinet of Ministers of 2019, pulse oximeters and 12 other categories of measuring instruments for medical purposes were excluded from the Technical Regulations of Legislatively Regulated Measuring Instruments. Meanwhile, the instruments remain legally regulated measuring instruments and are subject to periodic verification as particularly important during the COVID-19 pandemic. Of course, it is an indisputable fact that the quality and safety of medical services depends on the technical condition of medical devices. Therefore, systematic metrological verification directly affects the quality of medical procedures [18–19].

Since 2020, Ukraine has an updated regulatory document DSTU 8893:2019 "Metrology. Pulse oximeters. Calibration method". It applies to pulse oximeters and pulse oximetric channels of medical

monitors, which allow to assess the degree of oxygen saturation of human hemoglobin in non-invasive blood by measuring the modulation coefficients of light flux passing through human tissues in two bands and wavelengths. Also this document establishes the method of calibration of pulse oximeters: calibration operations, calibration tools, personnel qualification requirements, calibration conditions, safety requirements, preparation for calibration, processing of measurement results and registration of calibration results. This standard is used for periodic verification, post-repair verification (which does not change the type of measuring equipment), and it can be used for extraordinary, inspection and expert verification in accordance with the requirements [20].

Based on DSTU 8893:2019, the MD300M pulse oximeter, which is widely popular in the Ukrainian market of medical devices, was calibrated. This is a high-precision instrument for professional use, which has the following parameters when measuring oxygen saturation SpO₂: measuring range from 0% to 100%;

measurement step – 1%; measurement accuracy: in the range of 80 ... 100% – $\pm 2\%$, in the range of 70 ... 79% – $\pm 3\%$, in the range of $\leq 69\%$ – not precisely defined. Auxiliary equipment required for calibration is a measure for calibration of pulse oximeters (MCPO). The calibration conditions have been maintained, that is the ambient temperature is $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$; relative humidity – from 30% to 80%; atmospheric pressure –

$(100 \pm 6) \text{ kPa}$. An external inspection of the device was carried out, no mechanical damage was detected, during testing it turned out to be operational. The results of experimental studies are summarized in table 2, 3. Determination of metrological characteristics of the pulse oximeter is performed for the saturation measurement channel and the pulse rate measurement channel.

Table 2 – Calculation of metrological characteristics of the saturation measurement channel

№	$S_{MCPO}, \%$	$S, \%$					$\Delta S, \%$					$\Delta S_{max} \%$	ΔS_{PO}
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
1	99	98	98	97	98	100	-1	-1	-2	-1	1	2	2
2	95	96	96	93	97	96	1	1	-2	2	1		
3	85	84	87	83	83	88	-1	2	-2	-2	3		
4	75	75	72	75	75	77	0	-3	0	0	2	3	3
5	70	71	70	71	73	70	1	0	1	3	0		

Table 3 – Calculation of metrological characteristics of the pulse rate measurement channel

№	$F_{MCPO}, \text{min}^{-1}$	F, min^{-1}					$\Delta F, \text{min}^{-1}$					$\Delta F_{max}, \text{min}^{-1}$	$\Delta F_{PO}, \text{min}^{-1}$
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
1	40	41	40	39	41	41	1	0	-1	1	1	2	2
2	70	70	68	70	70	69	0	-2	0	0	-1		
3	120	121	121	122	121	120	1	1	2	1	0		
4	180	181	181	180	181	179	1	1	0	1	-1		
5	240	238	240	241	240	241	-2	0	1	0	1		

The pulse oximeter is considered to have passed the calibration according to this parameter, because the maximum deviation of the measured saturation value from the set for calibration of pulse oximeters does not exceed the absolute error of saturation measurement specified in the operating documentation for pulse oximeters – $\pm 3\%$.

The pulse oximeter is considered to have passed the calibration according to this parameter, because the maximum deviation of the measured value of the pulse rate from the specified measure for calibration of pulse oximeters does not exceed the absolute measurement error specified in the operating documentation – $\pm 2 \text{ min}^{-1}$.

We will calculate the uncertainty when measuring saturation with a pulse oximeter MD300M. The equation for measuring the absolute error of saturation has the form

$$\Delta S_{PO} = S_i - S_{MCPO}, \quad (1)$$

where S_i – the result of the i -th measurement of saturation PO, %; S_{MCPO} – the reference value of saturation reproduced by MCPO, %.

Uncertainty of measurement pulse oximeter readings S_i are estimated by type B uncertainty, given the discreteness

$$U_B(S_i) = \frac{a}{2\sqrt{3}}. \quad (2)$$

Uncertainty of measurement S_{MCPO} the readings of the reference measuring instrument are evaluated by two components of type B:

– taking into account the error of the reference measuring instrument Δ_p

$$u_B^1(S_{MCPO}) = \frac{\Delta_p}{\sqrt{3}}; \quad (3)$$

– taking into account the discreteness of the reference measuring instrument a_e

$$u_B^2(S_{MCPO}) = \frac{a_e}{2\sqrt{3}}. \quad (4)$$

Total standard uncertainty of determining the main error of saturation measurement

$$U_c(\Delta S_{PO}) = \sqrt{u_B^2(S_i) + u_B^1(S_{MCPO})^2 + u_B^2(S_{MCPO})^2}. \quad (5)$$

Extended uncertainty equals the product of the total standard uncertainty $u_c(\Delta S_{PO})$ and the coverage factor k ($k=2$ at a given probability $P=95\%$) and is determined

$$U(\Delta S_{PO}) = k \cdot u_c(\Delta S_{PO}). \quad (6)$$

Table 4 presents the budget of uncertainty in determining the absolute error in measuring saturation.

Table 4 – Budget uncertainty in determining the absolute error in measuring saturation

Input value	Estimation of input value	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	The contribution of uncertainty
S_i	S_i	$\frac{a}{2\sqrt{3}}$	1	$\frac{a}{2\sqrt{3}}$
S_{MCPO}	S_{MCPO}	$\frac{\Delta_p}{2\sqrt{3}}$	-1	$-\frac{\Delta_p}{2\sqrt{3}}$
S_{MCPO}	S_{MCPO}	$\frac{a_e}{2\sqrt{3}}$	-1	$-\frac{a_e}{2\sqrt{3}}$
Measuring value	Measurement result	Total standard uncertainty	Coverage ratio	Extended uncertainty
ΔS_{PO}	ΔS_{PO}	$u_c(\Delta S_{PO}) = \sqrt{u_B^2(S_i) + u_B^1(S_{MCPO})^2 + u_B^2(S_{MCPO})^2}$	2	$U(\Delta S_{PO}) = k \cdot u_c$

The MD300M pulse oximeter has the following input characteristics specified in the passport (saturation measurement mode): discreteness – 1%. The reference measuring instrument (MCPO-2) has the following input characteristics specified in the passport: error of

the reference measuring instrument $\Delta_p \pm 0,05\%$; discreteness – 0,5 %. The results of uncertainty calculations in determining the absolute error in measuring saturation at $S_{MCPO} = 85\%$ presented as an uncertainty budget in the table 5, $\Delta S_{PO} = (3,00 \pm 0,64)\%$.

Table 5 – The uncertainty budget of the absolute error in measuring saturation $S_{MCPO} = 85\%$

Input value	Estimation of input value	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	The contribution of uncertainty
S_i	88	0,29	1	0,29
S_{MCPO}	85	0,014	–1	–0,014
S_{MCPO}	85	0,14	–1	–0,14
Measuring value	Measurement result	Total standard uncertainty	Coverage ratio	Extended uncertainty
ΔS_{PO}	3	$\sqrt{0,29^2 + (-0,014)^2 + (-0,14)^2} = 0,32$	2	0,64

Analysis of the result of the uncertainty calculation of the absolute error in measuring saturation allows us to draw the following conclusion. The discreteness of the MD300M pulse oximeter, which is indicated in the passport for the device, has the greatest influence on the measurement uncertainty. Thus, it is impossible to reduce this contribution by repeated observations or in any other way, and for a more accurate result you need to choose a device with less discreteness. Let's calculate the uncertainty when measuring heart rate with MD300M pulse oximeter. The equation for measuring the absolute error of the heart rate has the form

$$\Delta F_{PO} = F_i - F_{MCPO}, \quad (7)$$

where F_i – the result of the i -th measurement of heart rate PO, %; F_{MCPO} – the reference value of pulse rate reproduced by MCPO, %.

Uncertainty of measurement F_i – readings of pulse oximeters is estimated by uncertainty of type B, considering discreteness

$$U_B(F_i) = \frac{a}{2\sqrt{3}}. \quad (8)$$

Uncertainty of measurement of the readings F_{MCPO} of the reference measuring instrument are evaluated by two components of type B:

– taking into account the error of the reference measuring instrument Δ_p

$$u_B^1(F_{MCPO}) = \frac{\Delta_p}{\sqrt{3}}; \quad (9)$$

– taking into account the discreteness of the reference measuring instrument a_e

$$u_B^2(F_{MCPO}) = \frac{a_e}{2\sqrt{3}}. \quad (10)$$

Total standard uncertainty for determining the main error of saturation measurement

$$U_c(\Delta F_{PO}) = \sqrt{u_B(F_i)^2 + u_B^1(F_{MCPO})^2 + u_B^2(F_{MCPO})^2}. \quad (11)$$

The extended uncertainty is equal to the product of the total standard uncertainty $u_c(\Delta F_{PO})$ on the coefficient of coverage k ($k=2$ at a given probability $P=95\%$) and is determined by the formula

$$U(\Delta F_{PO}) = k \cdot u_c(\Delta F_{PO}). \quad (12)$$

The uncertainty budget for determining the absolute error in measuring heart rate is presented in table 6.

The MD300M pulse oximeter has the following input characteristics specified in the passport (pulse rate measurement mode):

– discreteness – 1 min⁻¹;

The reference means (MCPO-2) of measurements has the following input characteristics which are specified in the passport: limits of admissible absolute error of values of pulse rate $\Delta_p \pm 0,2$ min⁻¹; discreteness – 1 min⁻¹.

The results of calculations when measuring heart rate at $F_{MCPO} = 240$ min⁻¹ presented as an uncertainty budget in the table 7: $\Delta F_{PO} = (2,00 \pm 0,82)$ min⁻¹.

Conclusions

Thus, the study of international and European experience in the use of oxygen therapy medical devices indicates an increase in attention to these medical devices in a pandemic. Over the past three years, the International Organization IMDRF has developed more than 10 methodological documents containing technical recommendations, specifications, accompanying guidelines for improving the availability of technologies and the use of pulse oximeters.

Table 6 – Uncertainty budget in determining the absolute error in measuring heart rate

Input value	Estimation of input value	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	The contribution of uncertainty
F_i	F_i	$a/2\sqrt{3}$	1	$a/2\sqrt{3}$
F_{MCPO}	F_{MCPO}	$\Delta_p/2\sqrt{3}$	–1	$-\Delta_p/2\sqrt{3}$
F_{MCPO}	F_{MCPO}	$a_e/2\sqrt{3}$	–1	$-a_e/2\sqrt{3}$
Measuring value	Measurement result	Total standard uncertainty	Coverage ratio	Extended uncertainty
ΔF_{PO}	ΔF_{PO}	$u_c(\Delta F_{PO}) = \sqrt{u_B(F_i)^2 + u_B^1(F_{MCPO})^2 + u_B^2(F_{MCPO})^2}$	2	$U(\Delta F_{PO}) = k \cdot u_c(\Delta F_{PO})$

Table 7 – Uncertainty budget in determining the absolute error in measuring heart rate $F_{MCPO} = 240 \text{ min}^{-1}$

Input value	Estimation of input value	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	The contribution of uncertainty
F_i	238	0,29	1	0,29
F_{MCPO}	240	0,058	-1	-0,058
F_{MCPO}	240	0,29	-1	-0,29
Measuring value	Measurement result	Total standard uncertainty	Coverage ratio	Extended uncertainty
ΔF_{PO}	-2	$\sqrt{0,29^2 + (-0,058)^2 + (-0,29)^2} = 0,41$	2	0,82

The study of pulse oximeter MD300M in accordance with the requirements of DSTU 8893:2019 "Metrology. Pulse oximeters. Calibration Method" 2020 Analysis of the MD300M pulse oximeter calibration results revealed that this pulse oximeter was calibrated by the saturation and pulse measurement channel, as the maximum deviation of the measured saturation value from the pulse oximeter calibration measure does not exceed the pulse oximeter $\pm 3\%$. The maximum deviation of the measured value of pulse rate from the set measure for calibration of pulse oximeters does not exceed the absolute measurement error specified in the operating

documentation on the pulse oximeter – $\pm 2 \text{ min}^{-1}$. Analysis of the result of calculating the uncertainty of the absolute error in measuring saturation allows us to conclude that the greatest influence on the uncertainty of measurement have the discreteness of the pulse oximeter MD300M and the discreteness of the reference device MCPO-2, which are specified in the passports.

Thus, it is impossible to reduce this contribution by repeated observations or in any other way, and for a more accurate result it is necessary to choose a device with less discreteness or not to consider this parameter as influencing the result when calculating.

REFERENCES

- Juliana, N., Azmani, S., Idrose, S., Amirfaiz, N., Roslan, A. (2017). Reliable monitoring of oxygen saturation via pulse oximetry: Which site to choose? *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, No. 9, pp. 122–129. doi: 10.4314 / jfas.v9i4S.54.
- Putu, Anna Andika, Rahmawati, Triana, Ridha, Mak M. (2019). Portable Pulse Oximeter. *JEEMI*, vol. 1, no. 1, pp. 28–32. doi: 10.35882/jeeemi.v1i1.6.
- Sidhartha, G., Dwarakanath, M.L., Vineeth, K.C., Sukruth, R. (2021). IoT Based Pulse Oximeter. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, vol. 9, is. VIII, pp. 2946–2951.
- Milner, Q.J., Mathews, G.R. (2012). An assessment of the accuracy of pulse oximeters. *Association of Anaesthetists*, vol. 67 (4), pp. 396–401. doi: 10.1111 / j.1365-2044.2011.07021.
- Choi, Byung-Moon, Kang, Bong Jin, Yun, Ho-Yong, Bokyoung, Jeon, Bang, Ji-Yeon, Noh, Gyu-Jeong (2019). Performance of the MP570T pulse oximeter in volunteers participating in the controlled desaturation study: a comparison of seven probes. *Anesth Pain Med*, vol. 15, no. 3, pp. 371–377. <https://doi.org/10.17085/apm.20028>.
- Jyotirmoy, Das, Amit, Aggarwal, Naresh, Kumar Aggarwal (2010). Pulse oximeter accuracy and precision at five different sensor locations in infants and children with cyanotic heart disease. *Indian Journal of Anaesthesia*, vol. 54, iss. 6, pp. 531–534.
- Podmasteryev, K.V., Dunaev, A.V., Kozyura, A.V., Zhrebtsov, E.A. (2012). Metrological support of biomedical devices and technologies for functional diagnostics. *Metrology in biomedical engineering. Biotechnosphere*, no. 5–6 (23–24), pp. 92–96.
- Sotova, B.I., Boriskina, M.O. (2013). Study of metrological reliability of pulse oximeters by statistical methods. *News of TulGU. Technical science*, vol. 6, (1), pp. 3–10.
- Konopelko, L.A., Rumyantsev, D.V., Suvorov, V.I. (2003). Metrological support of pulse oximeters. *Scientific Instrumentation*, vol. 13, no. 3, pp. 44–45.
- Tverytnykova, E., Drozdova, T., Demidova, Yu. (2020). Environmental management as a component of an integrated management system for gas condensate and oil processing enterprises. *Advanced information systems*, vol. 4, no. 1, pp. 133–138. doi: 10.20998/2522-9052.2020.1.06.
- Tverytnykova, E., Demidova, Yu., Drozdova, T. (2021). Management system of occupational safety at ukrainian enterprises: international and european dimension. *Advanced information systems*, vol. 3, no. 1, pp. 45–53. doi: 10.20998/2522-9052.2021.1.06.
- Kushnir, K. (2019). Problems of Metrological Provision of Activities of Primary Medical-Sanitary Assistance Bodies. *Metrology and instruments*, no. 3, pp. 67–71. doi: 10.33955/2307-2180(3)2019.67-71.
- WHO (2019). *Technical specifications for oxygen concentrators*. Geneva: World Health Organization; available at: http://www.who.int/medical_devices/publications/tech_specs_oxygen-concentrators/en/.
- Amene, Mulueta M., Bradley, Beverly, Karlstrom, Jonas, Hemmi, Andrew. (2019). *WHO-UNICEF technical specifications and guidance for oxygen therapy devices*. Geneva: World Health Organization and the United Nations Children's Fund. WHO medical device technical series, 132 p.
- Technical (2020) *Technical and Regulatory Aspects of the Use of Pulse Oximeters in Monitoring COVID-19 Patients*. Pan American Health Organization, 18 c.
- WHO (2020). *Priority medical devices list for the COVID-19 response and associated technical specifications*. Interim guidance 19 NOVEMBER 2020, 176 p.
- WHO (2020). *Technical and Regulatory Aspects of the Use of Pulse Oximeters in Monitoring COVID-19 Patients*. Interim guidance 7 August 2020, 18 p.

18. Technical regulations (2013) *Technical regulations on medical devices, approved by the resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine №753 of 02.10.2013*, available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/753-2013-%D0%BF/>.
19. Resolution (2015) *Resolution of the Cabinet of Ministers № 374 About the statement of the list of categories of legally regulated means of measuring equipment which are subject to periodic verification*, available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/374-2015-%D0%BF#Text>.
20. DSTU 8893:2019 (2020), *Metrology. Pulse oximetry. Method of verification*, Kyiv, 10 p.

Received (Надійшла) 10.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.02.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Тверитникова Олена Євгенівна – доктор історичних наук, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
Elena Tverytnykova – Doctor of Historical Sciences, Professor Department of Information and Measuring Technologies and Systems National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: tyveekhpi@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6288-7362>.

Дроздова Тетяна Василівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
Tatyana Drozdova – Senior Lecturer Department of Information and Measuring Technologies and Systems National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: drozdova.tv@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7315-5869>.

Демідова Юлія Євгенівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри педагогіки і психології управління соціальними системами Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
Yulia Demidova – Candidate of Technical Sciences, Assistant professor of Department of pedagogy and psychology of social systems management of The National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»;
 e-mail: dem-ula@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8295-5972>.

Кузьменко Наталія Олексіївна – кандидат історичних наук, завідувач кафедри радіоелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
Nataliia Kuzmenko – Candidate of Historical Sciences (PHD), Head of the Department of Radio Electronics National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute";
 e-mail: nkuzmenk@i.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9039-9494>.

Метрологічне забезпечення пульсоксиметрів

О. Є. Тверитникова, Т. В. Дроздова, Ю. Є. Демідова, Н. О. Кузьменко

Анотація. Розглянуто досвід організації International Medical Device Regulators Forum із застосування виробів для кисневої терапії на основі дослідження методичних рекомендацій, міжнародних та європейських нормативних документів щодо виробів медичного призначення. Акцентовано увагу на питаннях, пов'язаних з метрологічним забезпеченням пульсоксиметрів. Світова ситуація з пандемією підсилює актуальність обраної теми. Постійний моніторинг рівня насиченості крові киснем тобто сатурації є одним з важливіших елементів діагностики та лікування COVID-19. Незважаючи на те, що використання пульсоксиметрів не потребує спеціальних медичних знань, калібрування та особливого обслуговування, все-ж таки необхідно контролювати їхню надійність і точність вимірювання. Проведене дослідження пульсоксиметру MD300M згідно вимогам DSTU 8893:2019 «Метрологія. Пульсоксиметри. Методика повірки» 2020 р. Аналіз результатів повірки пульсоксиметра MD300M виявив, що даний пульсоксиметр пройшов повірку за каналом вимірювання сатурації та пульсу, оскільки максимальний відхил вимірюваного значення сатурації від заданого мірою для повірки пульсоксиметрів не перевищує зазначеної в експлуатаційній документації на пульсоксиметри абсолютної похибки вимірювання сатурації. Найбільший вплив на невизначеність вимірювання мають дискретність пульсоксиметра MD300M та дискретність еталонного приладу МППО-2, що зазначені в паспортах на відповідні прилади.

Ключові слова: метрологічне забезпечення; пульсоксиметр; COVID-19; повірка; міжнародні стандарти.

Метрологическое обеспечение пульсоксиметров

Е. Е. Тверитникова, Т. В. Дроздова, Ю. Е. Демидова, Н. А. Кузьменко

Аннотация. Рассмотрен опыт организации International Medical Device Regulators Forum по применению изделий для кислородной терапии на основе исследования методических рекомендаций, международных и европейских нормативных документов по изделиям медицинского назначения. Акцентируется внимание на вопросах, связанных с метрологическим обеспечением пульсоксиметров. Мировая ситуация с пандемией усиливает актуальность избранной темы. Постоянный мониторинг уровня насыщенности крови кислородом, т.е. сатурации, является одним из важнейших элементов диагностики и лечения COVID-19. Несмотря на то, что использование пульсоксиметров не требует специальных медицинских знаний, калибровки и особого обслуживания, все же необходимо контролировать их надежность и точность измерения. Проведено исследование пульсоксиметра MD300M согласно требованиям DSTU 8893:2019 «Метрология. Пульсоксиметры. Методика поверки» 2020 г. Анализ результатов поверки пульсоксиметра MD300M обнаружил, что данный пульсоксиметр прошел поверку по каналу измерения сатурации и пульса, поскольку максимальный отклон измеренного значения сатурации от заданной степени для поверки пульсоксиметрии не превышает указанной в эксплуатации. Наибольшее влияние на неопределенность измерения имеют дискретность пульсоксиметра MD300M и дискретность эталонного прибора МППО-2, указанные в паспортах соответствующих приборов.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение; пульсоксиметр; COVID-19; поверка; международные стандарты.

С. С. Штаненко¹, Ю. Я. Самохвалов², О. Ю. Іохов³, В. Г. Малюк⁴

¹ Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, Київ, Україна

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

³ Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна

МІКРОПРОЦЕСОРНІ СИСТЕМИ НА ПРОГРАМОВАНИХ ЛОГІЧНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМАХ ЯК ОБ'ЄКТ ДІАГНОСТИКИ

Анотація. Предметом дослідження в статті є методи тестування цифрових пристроїв, які реалізовані на програмованих логічних інтегральних схемах (ПЛІС). **Метою роботи** є обґрунтування підходу до діагностування мікропроцесорних систем у базисі ПЛІС, який являє собою подальший розвиток методу самодіагностики. **У статті вирішуються наступні завдання:** проведено аналіз існуючих методів тестування цифрових пристроїв, розкрито їх переваги та недоліки; проаналізовано існуючі підходи до діагностування мікропроцесорних систем, основу яких складають інтегральні схеми із програмованою структурою; запропоновано підхід до діагностування мікропроцесорних систем у базисі ПЛІС, в основу якого покладено принцип взаємодії процесорів між собою шляхом введення в багатопроцесорну систему сервісного процесора. **Отримані наступні результати:** доведено, що реалізація запропонованих моделей взаємодії процесорів між собою в багатопроцесорній системі надасть сервісному процесору діагностичну інформацію про технічний стан системи. Зазначено, що наявність діагностичної інформації про технічний стан мікропроцесорної системи є основою для прийняття рішення на відновлення системи шляхом перепрограмування ПЛІС. **Висновки:** розглянуто проблему діагностування мікропроцесорних систем у базисі ПЛІС. Проведено аналіз існуючих методів тестування інтегральних схем із програмованою структурою, відзначено їх переваги та недоліки. Запропоновано в якості діагностичного пристрою використовувати вбудований сервісний процесор, основною функцією якого є збір діагностичної інформації та прийняття рішення про реконфігурацію мікропроцесорної системи з метою оперативного автоматичного відновлення її функціонування.

Ключові слова: мікропроцесорна система; програмована логічна інтегральна схема; діагностика цифрових пристроїв.

Вступ

Стрімкий розвиток мікроелектронної технології в даний час дозволило серійно випускати великі і надвеликі інтегральні схеми (ВІС/НВІС), що містять тисячі елементів на кристалі і мають широкі функціональні можливості.

Одним з найбільш перспективних ВІС/НВІС, з точки зору досягнення найбільшої щільності розміщення елементів на кристалі, є інтегральні схеми (ІС), що мають регулярну структуру. Прагнення створити універсальну ВІС/НВІС, не вводячи значної структурної надмірності, призвело до появи спеціалізованих ІС (ASIC – *Application-Specific Integrated Circuit*), які мають індивідуальний характер функціонування та розробляються (проектуються) за конкретним замовленням. У цьому напрямі найважливішим досягненням стала поява ІС з програмованою структурою – програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС). ПЛІС представляє собою матрицю програмованих логічних елементів з *SPLD* (*Simple Programmable Logic Devices*), *CPLD* (*Complex Programmable Logic Device*), *FPGA* (*Field-Programmable Gate Array*), *FLEX* (*Flexible Logic Element Matrix*) структурами. За допомогою даних структур, застосовуючи на нижньому рівні (рівень регістрових передач) мови опису апаратури *AHDL*, *VHDL*, *Verilog*, на середньому (блочному) – технологію *System-on-Chip* та верхньому – високорівневі мови програмування *C/C++*, *System C*, *Python*, *Java*, ми отримуємо можливість проектувати не лише цифрові пристрої, а й мікропроцесорні системи.

На думку [1–4] саме застосування ПЛІС в якості елементної бази побудови сучасних мікропроце-

сорних систем на сьогоднішній день є перспективним напрямком з точки зору проектування високонадійних, відмовостійких (живучих) складних технічних систем, що функціонують в умовах несприятливого впливу, у тому числі і кібератак.

При проектуванні, виготовленні та подальшій експлуатації таких складних технічних пристроїв, якими є ІС, неминучі різного роду відхилення, наприклад, помилки проектування, несправності (дефекти) виготовлення, які в процесі функціонування призводять до відмови елементів та вузлів системи. Більшість цих відхилень, такі як, помилки проектування, незначно впливають на виконання заданих функцій, але деякі відхилення, наприклад, несправності (дефекти), а також відмови елементів і вузлів системи в процесі експлуатації, призводять до неправильного функціонування ІС, внаслідок чого вона не може використовуватися за призначенням. При цьому одним із найбільш поширених способів виявлення таких відхилень є тестове та функціональне діагностування. Так, згідно з [5–7] тестове діагностування полягає у подачі на входи ІС серії наборів тестових вхідних сигналів та спостереження за відповідною послідовністю вихідних сигналів. Такі дослідження, на рівні логічних елементів, дозволяють виявити помилки проектування та виготовлення, а також визначити несправності елементів ІС. При цьому під тестовим діагностуванням розуміється логічне тестування, при якому всі сигнали набувають два значення – 0 або 1.

Проте слід зазначити, що одним з недоліків логічного тестування є те, що воно не враховує фізичної природи вхідних та вихідних сигналів, перехідних процесів та затримок в елементах пристрою, їх

навантажувальних можливостях, а також впливу параметрів зовнішнього середовища на роботу ІС.

Функціональне тестування, в свою чергу, застосовується для перевірки правильності реалізації функцій, якими наділяється цифровий пристрій, не враховуючи при цьому інформацію про логічну структуру схеми. Так, основними видами функціонального тестування є випадкове та вичерпне тестування. При випадковому тестуванні тестові набори являють собою n -мірні двійкові вектори (псевдовипадкові послідовності), що генеруються датчиком випадкових чисел. При цьому дані послідовності мають усі необхідні для тестування властивості випадкових чисел, а також перевагу, що псевдовипадкова послідовність завжди може бути повторена, починаючи з будь-якого набору. Однак поряд з перевагами випадкового тестування існують також недоліки, які пов'язані зі складністю оцінки результатів тестування, іншими словами, із встановленням зв'язку довжини випадкового тесту з ймовірністю виявлення помилок.

У свою чергу, вичерпне тестування є межею випадкового тестування і являє собою таке тестування, при якому в тесті вичерпним чином перебираються всі 2^n комбінації тестових сигналів. При цьому успішне проходження вичерпного тесту рівнозначне доказу відповідності схеми вихідній булевої функції. Крім цього, вичерпний тест дуже легко генерувати, однак він має, принаймні, два недоліки.

Перший недолік у тому, що існують дефекти, які виводять схему з класу комбінаційних схем. Типовим дефектом такого роду є перемичка, яка не виявляється вичерпним тестуванням.

Другий недолік вичерпного тестування – велика довжина тесту. Так, для комбінаційної схеми розмірністю 10×2 необхідно подати на її входи 2^{10} тестових сигналів. Тому для більшості схем вичерпне тестування є складним.

Крім цього слід зазначити, що методи тестового та функціонального діагностування не дають повної діагностичної інформації про технічний стан ІС. А враховуючи той факт, що ІС з програмованою структурою створюють велику конкуренцію стандартним ІС, то питання, які пов'язані з необхідністю застосування існуючих та розробки нових методів діагностування ПЛІС є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день питанням тестування цифрових пристроїв (інтегральних схем) присвячено велику кількість досліджень. Так, у роботі [8] розглядається проблема низької ефективності відомих детермінованих методів побудови тестів для цифрових схем, головною причиною є некерований перебір всіх комбінацій сигналів, які забезпечують прояв несправності на виході елемента з дефектом. В якості переваги в роботі запропонований метод фокусування пошуку для побудови тестів.

У роботі [9] представлена кубічна технологія аналізу цифрових схем для генерації тестів та оцінки їх якості. Запропоновані кубічний метод обробки несправностей моделі примітиву та метод генерації тестів для константових несправностей, що викори-

стовують кубічні покриття списків несправностей для побудови шляху активізації.

В [10] проведено аналіз двох конкуруючих методів контролю та діагностування цифрових схем: спектральний метод та метод сигнатурного аналізу. Доведено, що спектральний метод є найефективнішим. Це пов'язано з тим, що спектрограми, на відміну від сигнатур, найбільш пристосовані до побудови словника несправностей. Крім цього, використовуючи спектральний метод, можна варіювати в широких межах інформативності діагностичних ознак залежно від необхідної глибини діагнозу.

У [11] запропоновано для тестування цифрових пристроїв застосовувати генетичні алгоритми, що становлять адаптивний пошуковий метод, заснований на селекції найкращих елементів популяції, тобто логічних елементів на інтегральній схемі. При цьому на ефективність даного алгоритму істотно впливає правильний вибір способу кодування особин, і навіть правильний вибір параметрів. У [12] розглянуто відносно новий безконтактний, індукційний метод діагностування радіоелементів технічно складних цифрових радіоелектронних блоків, який дозволяє визначати не тільки технічний стан контрольованого блоку, а й знайти радіоелектронний компонент, який спровокував несправність чи відмову блоку.

Проте слід зазначити, що в розглянутих роботах тестування цифрових схем, а також оцінка технічного стану цифрових пристроїв (справний, працездатний і правильно функціонуючий) розглядається з позиції того, що дані цифрові пристрої реалізовані на стандартних ІС, на відміну від ПЛІС, де структура носить реконфігураційний характер. При цьому необхідно відзначити, що тестування цифрових інтегральних схем з структурою, яка програмується, не залежить від функціонування кінцевого, створеного користувачем цифрового пристрою [13].

Враховуючи вищезазначене, **метою статті** є обґрунтування підходу до діагностування мікропроцесорних систем у базисі ПЛІС, який є подальшим розвитком методу самодіагностики, застосування якого дозволить підвищити живучість і як наслідок надійність складних технічних систем, що функціонують в умовах несприятливого впливу, у тому числі і кібератак.

Проблема тестування цифрових пристроїв у базисі ПЛІС

Програмовані логічні інтегральні схеми – перспективна архітектура ВІС/НВІС, яка на сьогоднішній день знаходить все більш широке застосування у якості типових елементів функціонально складних цифрових систем високого ступеня інтеграції.

Однією з переваг ПЛІС є те, що логіка роботи не визначається при виготовленні, а задається шляхом програмування, що дає можливість спростити процес синтезу складних цифрових схем. Другою перевагою стало те, що завдяки тій же регулярності структури вдається більш ефективно використовувати площу кристала, підвищуючи тим самим ступінь інтеграції. І, нарешті, третьою перевагою є те, що володіючи властивістю реконфігації, ПЛІС дозволяють проектувати

високонадійні, відмовостійкі мікропроцесорні системи, тим самим підвищуючи живучість, і як наслідок надійність складних технічних систем. Однак, незважаючи на низку переваг ПЛІС, таких, як регулярність структури та концептуальна простота процесу синтезу, їх тестування є трудомістким та складним процесом. Зростаюче застосування ВІС/НВІС в апаратурі, що виконують життєво важливі функції, такі, наприклад, як управління атомними електростанціями, навігація, системи управління технологічними процесами тощо, вимагає дуже глибокого тестування.

З іншого боку, навіть при використанні ефективних алгоритмів і потужних процесорних вимірювальних засобів для схем практичної складності не завжди вдається досягти 100% покриття несправностей. Так, згідно [13] одним із шляхів вирішення цієї проблеми є зміна та доповнення канонічної структури ПЛІС з таким розрахунком, щоб забезпечити потрібний рівень тестування. При цьому переслідуються такі цілі: спрощення генерації тестів; забезпечення генерації тестових послідовностей простими апаратними засобами, у випадку створення самотестованих ВІС/НВІС; підвищення покриваючої здатності тестових послідовностей; полегшення аналізу результату тестування. При цьому подальша реалізація цілей можлива, принаймні, трьома підходами [13].

Перший підхід – при проектуванні ПЛІС враховується необхідність її тестування, до схеми вносяться корективи, що полегшують цей процес. Побудовані на основі цього підходу ПЛІС прийнято називати зручнотестованими. При цьому всі методи побудови зручнотестованої ПЛІС можна розбити на два типи: які не змінюють канонічну дворівневу структуру ПЛІС; які використовують введення додаткових функціональних елементів, призначених для покращення тестування.

Другий підхід, заснований на запровадженні структурної надмірності, яка робить ПЛІС стійкою до відмови в тому сенсі, що несправності в ній або маскуються, або виявляються в момент виникнення.

Третій підхід передбачає обов'язкове додавання до структури ВІС/НВІС функціональних елементів, які здійснюють автономне тестування ПЛІС, в результаті виходить ВІС/НВІС із вбудованою діагностикою.

На сьогоднішній день ці підходи досить повно описані та реалізовані для ПЛІС першого покоління (PAL – Programmable Array Logic, GAL – Generic Array Logic) зі структурою комбінаційного типу. Дані типи структур є сукупністю двох матриць І та АБО, кожна з яких містить систему взаємно ортогональних шин, у точках перетину яких встановлюються напівпровідникові елементи зв'язку [13]. Однак з появою ПЛІС зі структурами, основу яких складають програмовані логічні блоки – макрокомірки, з'єднані із зовнішніми виводами та внутрішніми шинами (CPLD – структура) та CLB блоки (Configurable Logic Block) з таблицею відповідності LUT (Look Up Table), за допомогою якої задаються булеві функції від кількох аргументів (FPGA – структура) – виникають складності тестування даного типу ПЛІС. Крім цього, враховуючи той факт, що на базі даних структур створено

абсолютно новий напрямок розвитку мікроелектроніки – універсальні мікропроцесорні системи на кристалі (System-on-Chip – SoC, SoPC – System-on-a-Programmable-Chip, MPSoC – Multiprocessor System-on-Chip), то виникають складності тестування не просто цифрових пристроїв, а мікропроцесорних систем у базисі ПЛІС. При цьому технологія System-on-Chip складається з двох самостійних функціональних частин FPGA (Field-Programmable Gate Array – програмована вентильна матриця) та HPS (Hard Processor System – жорстка процесорна система), які з'єднані між собою інтерфейсом обміну даними. Розглянемо найефективніші методи тестування ПЛІС зі структурами CPLD та FPGA [14]:

Метод використання схем самодіагностики (BIST – Built-In-Self-Test). Цей метод полягає у реалізації на рівні прошивки ПЛІС спеціалізованої схеми (пристрою), що дозволяє проводити внутрішнє самотестування. На рис. 1 представлена структура самотестуючого пристрою, що складається з генератора тестових сигналів (TPG), аналізатора відгуку (ORA) та логіки управління. Суть даного методу полягає в подачі на вхід тестованого пристрою псевдовипадкових тестових наборів та подальше порівнювання результуючого значення з еталонним значенням у сигнатурному аналізаторі. Реалізація алгоритму на основі даного методу передбачає використання певного відсотка внутрішньої логіки ПЛІС, а при проведенні функціонального контролю необхідно перевіряти весь обсяг внутрішньої логіки. Тому цей метод найбільш зручно застосовувати для тестування внутрішніх блоків ПЛІС.

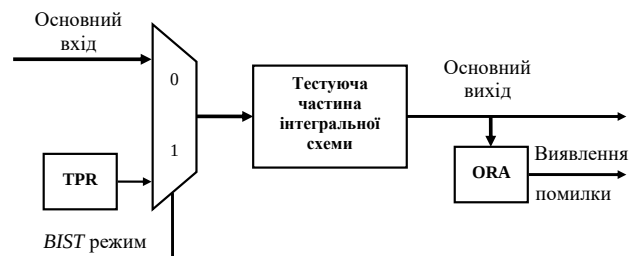


Рис. 1. Архітектура стандартної схеми самодіагностики (Fig. 1. The architecture of self-diagnosis standard scheme)

Метод повторювальних тестових множин (ILA – Iterative Logic Arrays). Його суть полягає в тому, що конфігураційні логічні блоки (CLB), з яких складається ПЛІС, конфігуруються таким чином, що вихідні сигнали попереднього блоку CLB є входними сигналами наступного блоку, утворюючи тим самим тестовий ланцюжок. Цей метод є оптимальним для функціонального контролю внутрішньої логіки ПЛІС. Однією з переваг методу є висока спостережувальність, що дозволяє визначити місце виникнення відхилення. Основним недоліком методу є необхідність використання спеціалізованого обладнання для проведення тестування, а також низька, порівняно з BIST, швидкість тестування.

Метод зчитування вихідних відгуків у вигляді вбудованих інтерфейсів. Цей метод використовується для проведення функціонального контролю вбу-

дованих блоків ПЛІС. Перевагами даного методу є висока швидкість та можливість проведення функціонального контролю без використання дорогого обладнання. Основним недоліком є те, що даний метод застосовується тільки для ПЛІС нового покоління за наявності спеціалізованого апаратного інтерфейсу *JTAG* (*Joint Test Action Group*) на базі стандарту *IEEE 1149.1*. При цьому тестування всієї ПЛІС є досить трудомістким і полягає в поєднанні даного методу з методом вбудованих схем самодіагностики у вигляді конфігураційної прошивки.

Таким чином, можна зробити висновок, що найефективнішим методом тестування є метод, заснований на техніці перевірки *BIST – Built-In-Self-Test*, тобто вбудованій самоперевірці. Виходячи з цього, подальший розгляд мікропроцесорних систем у базисі ПЛІС, з точки зору діагностування, спиратиметься саме на метод використання схем самодіагностики.

Підходи до діагностування мікропроцесорних систем у базисі ПЛІС

Мікропроцесорна система, як об'єкт діагностики, є складною обчислювальною структурою з шинною організацією. Вона складається з чотирьох основних груп ВІС/НВІС – мікропроцесора, пам'яті, контролерів введення-виводу та контролерів зв'язку з об'єктами. Кожна з цих функціональних підсистем, у свою чергу, є досить складною з точки зору діагностування. Тому при організації тестового та функціонального діагностування мікропроцесорних систем використовується декомпозиційний підхід, при якому як об'єкт діагностування виступають окремі функціональні пристрої: арифметико-логічний пристрій, процесор, оперативно-запам'ятовуючий пристрій, пристрій введення-виводу. На рис. 2, 3 представлені узагальнені схеми процесів діагностування мікропроцесорних систем, що складаються з об'єкта діагностування, засобів діагностування та системи усунення несправностей, тобто системи оперативного відновлення правильного функціонування.

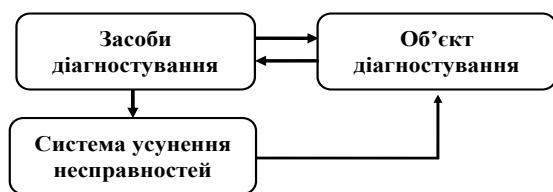


Рис. 2. Схема організації тестового діагностування (Fig. 2. The scheme of the organization of test diagnosing)

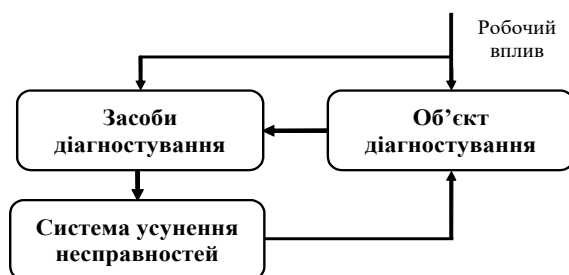


Рис. 3. Схема організації функціонального діагностування (Fig. 3. Scheme of organization of functional diagnostics)

Схема організації тестового діагностування (рис. 2) відрізняється від схеми організації функціонального діагностування (рис. 3) можливістю подачі на об'єкт діагностування спеціально організованих (тестових) впливів, у той час як у процесі функціонального діагностування використовується тільки робочий вплив. При цьому застосування даних схем у мікропроцесорних системах вирішують завдання оперативного виявлення помилок та пошуку місця несправності. Крім цього, при діагностуванні мікропроцесорних систем необхідно враховувати труднощі, які пов'язані з високим ступенем інтеграції ВІС/НВІС, розгалуженими зв'язками між елементами системи, а також відсутністю повної інформації про структуру системи. Окремо слід виділити труднощі діагностування мікропроцесорних систем у базисі ПЛІС, які пов'язані, як було зазначено вище, з реконфігураційним характером елементної бази систем, які розглядаються.

Саме з цих причин згідно [15, 16] існуючі методи (конструктивні та абстрактні) побудови діагностичних тестів для мікропроцесорних систем на стандартних ІС (метод таблиці функцій несправностей, метод існуючих шляхів, *D*-алгоритм, метод еквівалентної нормальної форми, булеве диференціювання, моделі регістрових передач, мережева модель Петрі тощо) не завжди можуть бути ефективними для діагностування мікропроцесорних систем у базисі ПЛІС. Крім цього, згідно [17] використання зовнішніх засобів контролю та діагностування в мікропроцесорних системах є, як правило, невиправданим. Це пов'язано з тим, що втручання у роботу мікропроцесорної системи призводить до її ускладнення і зниження, як продуктивності, так і надійності системи.

Виходячи зі сказаного, для визначення технічного стану мікропроцесорної системи в базисі ПЛІС, а також діагностування несправностей у ній, є доцільним використання принципів взаємодії процесорів між собою шляхом введення до складу багатопроцесорної системи сервісного процесора [18]. Основною функцією такого процесора є діагностика багатопроцесорної системи та оперативне автоматичне відновлення шляхом реконфігурації системи, тобто перепрограмування ПЛІС.

Таким чином, подальше підвищення живучості і як наслідок надійності, а також розширення функціональних можливостей багатопроцесорної системи в базисі ПЛІС пов'язане з використанням апаратної надмірності, шляхом введення до складу системи спеціальних апаратних засобів, що реалізують функцію спостереження, тобто використання принципу взаємодії.

Розглянемо найбільш поширені моделі взаємодії (*P* -, *B* -, *R* -, *K* - моделі), що описують діагностування та контроль у багатомашинних системах [17]. Так, *P* – модель (*Preparato-Metze-Chien*) заснована на представленні процесу діагностування взаємодією пар модулів, наслідком якого є одержання множини результатів діагностування. Діагностична модель представляється у вигляді діагностичного графа, де модулі – це вершини, а міжмодульні зв'язки – дуги [19].

У моделі модуль $\mathcal{G}_i$ контролює модуль $\mathcal{G}_j$, а загальна кількість модулів – n . Перевірка за допомогою тестової послідовності h_{ij} модулем $\mathcal{G}_i$ технічного стану модуля $\mathcal{G}_j$ називається елементарною перевіркою, а її результат позначається r_{ij} . Сукупність тестів h_{ij} утворює множину J , а сукупність елементарних перевірок r_{ij} – множину R , $R = \{r_{ij}\}$, яка називається синдромом. Уся множина J перевірок здійснюється за один цикл діагностування. Результат елементарної перевірки позначається «0», якщо тест «пройшов», і «1» – в іншому випадку.

B – модель (Barsi-Grandoni-Maestrini) відрізняється від P – моделі лише тим, що недійсним вважається отримання результату контролю $r_{ij} = 0$ за наявності відмов одночасно в елементах $\mathcal{G}_i$ і $\mathcal{G}_j$. При цьому застосування B – моделі призводить до меншої кількості допустимих станів працездатності системи [20].

R – модель (Russel-Kime) передбачає опис перевірки одного елемента декількома іншими апаратно або за допомогою програмних процедур [21]. У системах, що описуються такими моделями, n елементам ставиться у відповідність множина F_0 допустимих поодиноких несправностей $f_i: F_0 = (f_1, \dots, f_n)$, для яких задається множина J тестів $h_j, j = 1, \dots, p, J = \{h_1, \dots, h_p\}$. При цьому передбачається, що кожен тест є повним для однієї несправності з множини F_0 .

І нарешті K – модель (Makam-Avizienis) виділяє такі види несправностей [22]: $A = a_1, \dots, a_{|A|}$ – множина атомарних несправностей; $M = m_1, \dots, m_{|M|}$ – множина макронесправностей; $P = p_1, \dots, p_{|P|}$ – множина групових дефектів, де $|A|, |M|, |P|$ – потужність множин A, M, P відповідно.

Множина атомарних несправностей A описує відмови на найнижчому логічному рівні системи. Вони можуть бути описані переліком функціональних елементів чи постійними несправностями. Групові дефекти множини M являють собою фізично або логічно замінені частини системи, які визначають глибину пошуку дефекту в системі. Макронесправності є наслідком виникнення підмножини атомарних несправностей з множини несправностей A .

Між множинами несправностей існують певні відношення. Зокрема, введена функція f_{ap} з A в P і відображення зв'язку r_{am} між A і M , а також r_{pm} між M і P . Функція f_{ap} із A в P , що позначається $f_{ap}: A \rightarrow P$, призначає кожній атомарній несправності один і тільки один груповий дефект. Вважається, що груповий дефект виник, якщо є атомарна несправність, тобто $\forall a_i \in A$, $\exists p_i \in P: f_{ap}(a_i) = p_j$.

Відображення r_{am} описує зв'язок між елементами множини A і M , при якій макронесправність m_j виникає щоразу, як тільки з'являється атомарна несправність a_i . У багатьох випадках відображення r_{am} вдається представити функцією f_{am} . Зв'язок між елементами множини M і P полягає в тому, що якщо m_j – дефект з групового дефекту, то принаймні один з дефектів є наслідком макронесправності.

Елементи множин A, M, P є поодинокими несправностями системи. Для завдання наборів несправностей для кожної з цих множин визначають множини A', M', P' підмножин всіх елементів відповідно з A, M, P , тобто. $M' \subseteq C(M)$; $A' \subseteq C(A)$; $P' \subseteq C(P)$. Для множин A', M', P' визначають функції f_{AP} і f_{AM} таким чином:

$$f_{AP}: A' \rightarrow C(P), f_{AM}: A' \rightarrow C(M), \forall A^i \in A',$$

$$f_{AP}(A^i) = P^j = \{p_k | p_k = f_{ap}(a_i), a_i \in A^i\};$$

$$f_{AM}(A^i) = M^j = \{m_k | a_k r_{am} m_k, a_i \in A^i\},$$

діагностування в системі проводиться за допомогою атомарних тестів u_i множин $U = \{u_1, \dots, u_{|U|}\}$ і макротестів h_j множин $T = \{h_1, \dots, h_j, \dots, h_{|T|}\}$, а також вхідних послідовностей множин $J = \{J_1, \dots, J_{|J|}\}$.

Атомарний тест полягає в спостереженні одного виходу в момент часу при подачі на вхід схеми вхідної послідовності. Макротест являє собою множину атомарних тестів. Таким чином, порівнюючи моделі між собою, можна відзначити, що P - і B - моделі орієнтовані переважно на діагностування з використання результатів взаємодії елементів між собою. В R - і K - моделях при пошуку несправностей (дефектів) більшою мірою враховується функціональна структура об'єкта діагностування, діагностичні ознаки та можливості програмних засобів. Крім цього, реалізація даних моделей взаємодії дає можливість за наявності діагностичної інформації про технічний стан мікропроцесорної системи приймати сервісним процесором рішення про її реконфігурацію, тобто перерозподіл задач (функцій) шляхом перепрограмування ПЛІС.

Так, на сьогоднішній день згідно [23] існує два підходи до організації перерозподілу задач у системі при відмовах модулів. Перший підхід – статичний, передбачає, що відома підмножина $S = \{s_v\}$ станів системи, для якої необхідно здійснювати перерозподіл завдань, і потрібно знайти множину $\Gamma = \{G_v\}$ розподілів завдань таку, що кожен розподіл G_v , який відповідає стану s_v , задовольняє вимогам, які висуваються до показників живучості. При цьому оптимальні розподіли G_v для всіх станів $s_v \in S$ знаходяться при проектуванні системи, і кожен модуль при побудові системи забезпечується ресурсами, необхідними для виконання завдань, як у стані s_0 , так і в кожному стані $s_v \in S$ відповідно до

знайдених розподілів G_V . При переході системи в стан $s_V \in S$ та виявленні факту відмови у всіх працездатних модулях системи починається виконання завдань, що відповідають розподілу G_V .

Другий підхід, який називається динамічним, заснований на тому, що завдання знаходження оптимального розподілу G_V для стану s_V вирішується щоразу (за допомогою спеціального вирішального блоку, тобто сервісного процесора) під час переходу системи в стан s_V і результат її вирішення може залежати від попередніх станів системи. У загальному випадку, як при статичному, так і при динамічному підходах отримання оптимального розподілу може вимагати перерозподілу завдань як модулів, які відмовили, так і працездатних модулів.

Резюмуючи сказане, можна констатувати, що реалізація принципу взаємодії процесорів шляхом введення до складу багатопроцесорної системи в базисі ПЛІС сервісного процесора дає можливість оцінювати не тільки технічний стан системи, а також приймати рішення щодо автоматичного відновлення системи шляхом перепрограмування ПЛІС.

Висновки

Розглянуто проблему діагностування мікропроцесорних систем у базисі ПЛІС, як основу побудови складних технічних систем, які функціонують в умовах несприятливого впливу, у тому числі і кібератак. Проведено аналіз існуючих методів тестування інтегральних схем із програмованою структурою, відзначено їх переваги та недоліки. Запропоновано в якості діагностичного пристрою використовувати сервісний процесор як невід'ємний елемент багатопроцесорної системи. Такий процесор дозволить не лише збирати діагностичну інформацію, а й приймати рішення про реконфігурацію системи з метою оперативного автоматичного відновлення її функціонування шляхом перепрограмування ПЛІС.

Загалом, запропонований підхід до діагностування мікропроцесорних систем у базисі ПЛІС є подальшим розвитком методу самодіагностики. Крім цього якщо наділити складну технічну систему властивістю адаптації до умов функціонування, що змінюються, то таку систему можна розглядати як систему з елементами штучного інтелекту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ (REFERENCES)

1. R. Joost and R. Salomon, "Advantages of FPGA-based multiprocessor systems in industrial applications," 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005., 2005, pp. 6 pp., doi: 10.1109/IECON.2005.1568946.
2. Mousavi, M., De, S., Pourshaghagh, H. R., & Corporaal, H. (2019). Fault Tolerant FPGAs: where to spend the effort? In N. Konofaos, & P. Kitsos (Eds.), Proceedings – Euromicro Conference on Digital System Design, DSD 2019 (pp. 651-654). [8875164] Institute of Electrical and Electronics Engineers. doi.org/10.1109/DSD.2019.00103
3. Самохвалов Ю.Я. Забезпечення кібербезпеки АСУ ТП шляхом застосування ПЛІС технології / Ю.Я. Самохвалов, С.В. Толіюпа, С.С. Штаненко. – Науковий журнал Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Безпека інформаційних систем і технологій № 1, 2021 стр. 44 – 52. ISSN 2707-1758.
4. Самохвалов Ю.Я. & Штаненко С.С. Технологія System-on-Chip як основа підвищення живучості складних технічних систем. *Сучасна спеціальна техніка*. ДНДІ МВС України. Київ: №3(66), 2021. С. 31 – 43.
5. Фізичні основи теорії надійності: підручник / М. К. Жердев, С. В. Ленков, Б. П. Креденцер та ін.; за ред. М. К. Жердева. – К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2008. – 215 с.
6. Діагностування аналогових і цифрових пристроїв радіоелектронної техніки / [В.В. Вишнівський, М.К. Жердев, С.В. Ленков, В.А. Проценко]; под ред. М.К. Жердева, С.В. Ленкова – М.: Сов. радио, 2009. – 224 с.
7. Гуляев В.А. Техническая диагностика управляющих систем. – Киев: Наук. думка, 1983. – 208 с.
8. Куліков В.М. Порівняльний аналіз методів побудови тестів для цифрових пристроїв. Збірник наукових праць ІСЗІ НТУУ «КПІ», Information Technology and Security, № 2(2), 2012. С. 34 – 44.
9. Хаханов В.И., Сысенко И.Ю., Хак Х.М. Джахирул, Масуд М.Д. Мехеди. Кубическое моделирование неисправностей цифровых проектов на основе FPGA, CPLD. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. 2001. № 1. С. 123-129.
10. Ручко В.В. Контроль цифровых схем с помощью спектрограмм. / В.В. Ручко, Ю.Г. Савченко, А.В. Хмелева // Управляющие системы и машины. – К.: Наукова думка. – №3(71), 1984. – С. 28 – 31.
11. Гордилов А.Ю. Постановка задачи диагностирования программируемых логических интегральных схем и анализ возможности применения генетических алгоритмов для ее решения. Научный журнал «Фундаментальные исследования». – №10, 2013. – С. 598 – 562. ISSN 1812-7339
12. Кузавков В. В., Гайдур Г. І., Серих С. О., Редзюк С. В. Безконтактний індукційний метод визначення технічного стану цифрового блока: розрахунок потужності випромінювання провідника. *Зв'язок*. 2016. №1. С. 32–39.
13. Бутаков Е.А. Диагностика программируемых логических матриц / Е.А. Бутаков, М. Б. Волынский, В.Г. Новоселов. – М.: Радио и связь, 1991. – 157 с.
14. Огурцов А.А. Проведение функционального контроля программируемых логических интегральных схем // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 4. С. 137–146.
15. Слесарев М. В. Особенности разработки и применения аппаратуры тестирования и разбраковки многоядерных серверных микропроцессоров / М. В. Слесарев, С. В. Юрлин // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 3. С. 62 – 68.
16. Микони С. В. Общие диагностические базы знаний вычислительных систем, СПб.: СПИИРАН. – 1992. – 234 с.
17. Коваленко А. Е., Гула В. В. Отказоустойчивые микропроцессорные системы. К.: Техніка, 1986. 150 с.
18. Погребинский С. Б. Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ / С.Б. Погребинский, В.П. Стрельников. – М.: Радио и связь, 1988. – 168 с.
19. Preparato F. P. On the Connection Assignment Problem of Diagnosable Systems / F. P. Preparato, G. Metze, R. J. Chien // IEEE Trans. 1967. № 6. P. 848–854.
20. Barsi T., Crandoni T., Maestrini P. A. Thecry of Diagnosability of Digital Systems / IEEE Trans., 1976. № 6. P. 585 – 593.
21. Russel J., Kime C. Sistem Fault Diagnosability Without Repair // IEEE Trans. 1975. vol. C-24. №11. P. 1078 – 1089.
22. Kime C. K. An Abstract Model for Digital System Diagnosis // IEEE Trans. vol. C-28. № 8. P. 754 – 767.

23. Лазарев В.Г. Построение программируемых управляющих устройств / В.Г. Лазарев, Е. И. Пийль, Е. Н. Турута. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 192 с.

Received (Надійшла) 28.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.01.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Штаненко Сергій Станіславович – кандидат технічних наук, доцент, докторант науково-організаційного відділу, Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, Київ, Україна;

Serhii Shtanenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Doctoral Student of the Scientific and Organizational Department, Heroes of Kruty Military Institute of Telecommunications and Informatization, Kyiv, Ukraine; e-mail: sh_sergei@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9776-4653>.

Самохвалов Юрій Якович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інтелектуальних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ, Україна;

Yurii Samokhvalov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Intellectual Technologies, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine; e-mail: yu1953@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5123-1288>.

Іохов Олександр Юрійович – доктор технічних наук, доцент, начальник кафедри військового зв'язу та інформатизації, Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна;

Oleksander Iokhov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Military Communication and Informatization, National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine; e-mail: iokhov@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1718-0138>.

Малюк Віктор Григорович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри військового зв'язу та інформатизації, Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна;

Victor Maliuk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Military Communication and Informatization, National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine; e-mail: vgmaluk@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6510-3025>.

Микропроцессорные системы на программируемых логических интегральных схемах как объект диагностики

С. С. Штаненко, Ю. Я. Самохвалов, А. Ю. Иохов, В. Г. Малюк

Аннотация. Предметом исследования в статье являются методы тестирования цифровых устройств, реализуемых на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). **Целью работы** является обоснование подхода к диагностированию микропроцессорных систем в базе ПЛИС, который является дальнейшим развитием метода самодиагностики. **В статье решаются следующие задачи:** проведен анализ существующих методов тестирования цифровых устройств, раскрыты их преимущества и недостатки; проанализированы существующие подходы к диагностированию микропроцессорных систем, основу которых составляют интегральные схемы с программируемой структурой; предложен подход к диагностированию микропроцессорных систем в базе ПЛИС, в основу которого положен принцип взаимодействия процессоров между собой путем ввода в микропроцессорную систему сервисного процессора. **Получены следующие результаты:** доказано, что реализация предлагаемых моделей взаимодействия процессоров между собой в микропроцессорной системе наделит сервисный процессор диагностической информацией о техническом состоянии системы. Отмечено, что наличие диагностической информации о техническом состоянии микропроцессорной системы является основанием для принятия решения на восстановление системы путем перепрограммирования ПЛИС. **Выводы:** рассмотрена проблема диагностирования микропроцессорных систем в базе ПЛИС. Проведен анализ существующих методов тестирования интегральных схем с программируемой структурой, отмечены их преимущества и недостатки. Предложено в качестве диагностического устройства использовать встроенный сервисный процессор, основной функцией которого является сбор диагностической информации и принятие решения о реконфигурации микропроцессорной системы с целью оперативного автоматического восстановления ее функционирования.

Ключевые слова: микропроцессорная система; программируемая логическая интегральная схема; диагностика цифровых устройств.

Microprocessor systems based on programmable logic devices as an object of diagnostics

Serhii Shtanenko, Yurii Samokhvalov, Oleksander Iokhov, Victor Maliuk

Abstract. The subject of research in the article is the methods of testing digital devices implemented on programmable logic devices (PLDs). **The aim of the research** is to substantiate the approach to diagnosing microprocessor systems based on PLD, which is a further development of the self-diagnostics method. **The following tasks are solved in the article:** the analysis of existing methods for testing digital devices is conducted, their advantages and disadvantages are disclosed; analyzed the existing approaches to the diagnosis of microprocessor systems, which are based on integrated circuits with a programmable structure; an approach to diagnosing microprocessor systems based on PLDs is proposed, which is based on the principle of interaction between processors by introducing a service processor into a multiprocessor system. **The following results have been obtained:** it has been proved that the implementation of the proposed models of interaction between processors in a multiprocessor system will provide the service processor with diagnostic information about the technical state of the system. It is noted that the availability of diagnostic information about the technical condition of the microprocessor system is the basis for making a decision to restore the system by reprogramming the PLD. **Conclusions:** the problem of diagnosing microprocessor systems in the PLD basis is considered. The analysis of existing methods for testing integrated circuits with a programmable structure has been conducted, their advantages and disadvantages have been noted. It is proposed to use the built-in service processor as a diagnostic device, the main function of which is to collect diagnostic information and make a decision on the reconfiguration of the microprocessor system in order to quickly restore its functioning automatically.

Keywords: microprocessor system; programmable logic devices; diagnostics of digital devices.

Methods of information systems protection

УДК 004.07

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.1.15>

Д. Г. Волошин, С. С. Бульба

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

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ СПУФІНГУ БПЛА

Анотація. У роботі представлений інтелектуальний метод виявлення спуфінгу БПЛА. Відмінною особливістю методу є використання технології розрахунку субтраєкторії на основі субтраєкторій візуальної одометрії та GPS-положень у ковзаючому вікні з урахуванням інтелектуальної оцінки оптичного потоку та формування дескрипторів «Его-переміщення» БПЛА. У ході дослідження проведено аналіз та порівняльні дослідження широкого спектру методів спуфінгу БПЛА, виявлено найчастіше рекомендовані та практично використовувані методи. Зроблено висновки про актуальність проблематики GPS спуфінгу. Проведено аналіз методів захисту від GPS спуфінгу БПЛА. Виявлено перспективні напрямки інтелектуального виявлення спуфінгу БПЛА з використанням методів та засобів візуальної одометрії. У ході дослідження методів фіксації вхідних даних запропоновано підхід оцінки оптичного потоку з використанням ковзного вікна. При цьому аргументовано доведено необхідність інтелектуальної обробки вхідних даних. Оцінку оптичного потоку та формування дескрипторів проводилася з використанням рекурентних згорткових нейронних мереж. В результаті розроблено структурну схему методу виявлення спуфінгу БПЛА. Це дало змогу провести дослідження розробленого методу. Результати експерименту для двох сценаріїв спуфінгу показали ефективність оцінки положень не менше двох з трьох показників в умовах використання ковзаючих вікон розміром від 15 і вище, з годинною затримкою, що становить половину розміру вікна.

Ключові слова: спуфінг; БПЛА; ковзаюче вікно; оптичний потік; дескриптор.

Постановка проблеми

У сучасних умовах використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в більшості випадків їхнє управління виконується з використанням глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), а також з використанням глобальної системи позиціонування (GPS). Однак, в умовах зон підвищеного ризику, використання системи навігації піддаються ряду ризиків. Наприклад, з деяких джерел [1, 2] відомо, що GPS схильна до ризику навмисних і ненавмисних атак і перешкод. Серед навмисних атак можна відзначити глушіння і різноманітні підміни. Оскільки підміни виконуються, як правило, непомітно, а також викликають найбільші втрати саме вони є найбільш серйозною загрозою. Проведений аналіз частіших випадків кібератак на БПЛА дозволив зробити висновок про підвищення числа зловмисних підмін шляхом спуфінгу GPS. Пов'язано це з тим, що за допомогою спуфінгу GPS можна успішно перехопити БПЛА, змінивши траєкторію польоту і пункт призначення без сповіщення користувачів БПЛА.

Ряд результатів досліджень показав успішність проведення подібних атак на БПЛА. Так, наприклад, у роботі [3] представлені результати експерименту з успішного спуфінгу GPS, змінами розташування БПЛА і прив'язки до часу. В [4] аргументовано описані можливі умови успішного спуфінгу та практичні рекомендації. В [5] описані результати практичного експерименту перехоплення БПЛА та його проведення у зазначену точку. У [6] представлені результати дослідження методу прихованого спуфінгу БПЛА, що забезпечують аргументоване теоретичне обґрунтування задач спуфінгу в інтегрованих середовищах глобальної системи GPS-позиціонування та інерційної навігаційної системи INS. Слід зазначити, що наведені приклади є лише незначною частиною

доказів зростання популярності атак спуфінгу БПЛА, а також активного використання кібератак спуфінгу GPS БПЛА.

Проведені дослідження дозволили класифікувати основні технології спуфінгу GPS БПЛА та виділити з них основні методи: імітатори сигналів GPS, спуфери на основі простих приймачів, а також спуфери на основі складних приймачів.

До першої категорії можна віднести види імітаторів GPS сигналу, об'єднані інтерфейсом різної частоти. Цей вид спуфінгу дає змогу імітувати справжній сигнал GPS. Синхронізація помилкових сигналів із реальними у цьому методі не потрібна. Цей метод спуфінгу не складний у реалізації. Проте такі атаки виявляються штатними засобами захисту. Другий вид спуфінгу складніший. Вимагає, щоб GPS-приймач був пов'язаний з передавачем підробки. Це дозволяє виявити показники розташування, часу та координат супутників та синхронізує підроблені сигнали GPS із реальними. Цей вид спуфінгу порівняно з першим (імітатором сигналу GPS) виявити складніше. Третя категорія передбачає, що положення та швидкість фазового центру приймальної антени БПЛА-жертви точно відомі. І саме цей тип спуфінгу найнебезпечніший з погляду його виявлення. Для виявлення цього виду кіберзлочинів необхідно проведення додаткових досліджень та удосконалення методів захисту БПЛА від спуфінгу GSM.

Аналіз літератури [7-13] показав, що в даний час методи захисту від спуфінгу GSM можна розділити на методи автономного приймача глобальної супутникової навігаційної системи (GRS) і методи гібридного приймача позиціонування (HPR).

У методах GRS отриманий сигнал обробляється для визначення справжності (автентичності). Ці методи засновані на просторовій [7] та часовій [8] обробці, аналізі розподілу вихідних сигналів корелятора [9], захисті

від вторинних сигналів [10] та автономному контролю цілісності [11]. Одним із основних недоліків перерахованих методів є велика ймовірність помилки результуючого рішення у випадках використання зломисниками сучасних методів обробки та обфускації сигналів, а також використання сучаснішого обладнання. У методах *HPR* для виявлення і запобігання спуфінгу *GPS* використовуються допоміжні дані про місцезнаходження БПЛА від додаткових систем і служб, таких як інерціальна навігаційна система (*INS*) [11], система стільникового зв'язку або *Wi-Fi* [11], а також систем позиціонування на основі візуальної одометрії [12].

Незважаючи на перспективність перелічених підходів та методів захисту, недоліки пов'язані з необхідністю постійного калібрування в інерційних навігаційних системах, складністю оцінки підроблених фреймів на об'єднаних виходах *GPS/INS*, а також можливою відсутністю засобів стільникового зв'язку та *Wi-Fi* у віддалених або важкодоступних місцях істотно знижують точність оцінки ситуації при виявленні спуфінгу. Крім того, зазначені допоміжні системи позиціонування синхронізуються за часом з використанням *GPS*, що також потребує резервування даних про час.

Окремо слід зазначити методи, які використовують у комплексі додаткові дані від засобів у системах позиціонування на основі візуальної одометрії та засобів візуальної картографії. У роботі [13] детально описані можливості використання даного підходу при отриманні даних від вимірювальних блоків, висотоміра і радара при навігації БПЛА. Водночас високі вимоги до обчислювальної потужності та вартості значною мірою звужують область використання зазначеного підходу на практиці.

У той же час, технічні засоби візуальної одометрії використовуються як допоміжні в процесі захисту від спуфінгу. Їхня робота не залежить від сигналів *GPS* та інших радіочастотних перешкод. Цей факт підтверджується авторами роботи [12], в якій запропоновано методику аналізу місцезнаходження при виявленні спуфінгу БПЛА.

Враховуючи представлені результати аналізу, доцільно вдосконалити методи гібридного приймача позиціонування (*HPR*) на основі аргументованого вибору вхідних даних візуальної одометрії, а також розвитку методів їх обробки. Зокрема пропонується використовувати дані щодо відносної траєкторії БПЛА для порівняння з абсолютною траєкторією, яку можна контролювати за допомогою *GPS*. У запропонованому методі відсутня залежність від низки засобів отримання вхідних даних (наприклад, інерційний вимірювальний блок, радар, висотомір та інші), що спрощує процес збирання та обробки даних. Також не розглядаються вхідні дані цифрової моделі рельєфу, супутникового зображення та інше, що знижує обчислювальне навантаження у системі.

1. Виявлення спуфінгу GSM з урахуванням методів візуальної одометрії

При формалізації методу виявлення спуфінгу БПЛА, що розробляється, важливими є обмеження на дані, відомі кіберзлочинцю, і використовуються ним для виконання деструктивних дій. У разі заміни *GSM*

спуффер володіє даними про миттєве місце розташування об'єкта атаки, заздалегідь заданої траєкторії та пункт призначення БПЛА. Крім того, спуффер може генерувати і транслювати підроблені сигнали *GPS*, так, що траєкторія польоту БПЛА, що моделюється з підроблених даних про місцезнаходження *GPS*, збігається із заздалегідь заданою траєкторією. В результаті, коли позиції, отримані з підроблених сигналів *GPS*, показують заздалегідь задану траєкторію руху, атакований БПЛА слідує іншою, хибною, траєкторією, і прямує до помилкового пункту призначення. Таким чином, фактична траєкторія руху БПЛА, що прототипується на основі отриманих даних візуальної одометрії, не збігається із заздалегідь визначеною траєкторією.

Назвемо надалі фактичну траєкторію, якою перенаправляється атакований БПЛА істинною траєкторією атакованого БПЛА.

Пропонований метод виявлення спуфінгу БПЛА з використанням технологій візуальної одометрії заснований на можливостях отримання даних за допомогою штатних одометричних засобів (камери БПЛА, пасивних датчиків та ін.). У більшості практичних випадків це зображення, які включають до свого складу геотеги координат *GPS*. У разі підміни *GPS* фальшиві *GPS*-координати використовуються для геотегування зображень БПЛА. Також однією з можливостей запропонованого методу є удосконалений підхід порівняння двох траєкторій польоту, які одночасно визначаються для руху БПЛА за допомогою двох різних способів позиціонування. Перша траєкторія формується на основі *GPS*-координат, друга прототипується на основі зображень БПЛА, отриманих за допомогою візуальної одометрії.

Продемонструємо подане завдання у вигляді рис. 1. Припустимо, лінії *ABC* рис. 1 це наперед визначені траєкторії руху БПЛА, точка *A* – точка початку виконання польотного завдання, а точка *C* – точка призначення. Також припустимо, що в момент досягнення БПЛА точки *B*, кіберзлочинці проводять атаку спуфінгу *GPS*. Внаслідок цього БПЛА відкладається від заданої траєкторії та входить у лінію *BC'* замість лінії *BC*. Як уже згадувалося, при використанні методу спуфінгу на основі складних приймачів, підроблені *GPS* положення продовжують вказувати на те, що БПЛА слідує заданій траєкторії (лінії *BC*). Проте, насправді, справжня траєкторія атакованого БПЛА відповідає лінії *BC'*. Отже, на рис. 1 лінія *ABC* є справжньою траєкторією атакованого БПЛА.

Порівняння цих траєкторій використовують для виявлення спуфінгу. Однак це порівняння не відповідає на питання про час та місце проведення атаки спуфінгу. Щоб усунути цей недолік замість порівняння повної істинної траєкторії БПЛА з реальною, пропонується використовувати зіставлення на основі ковзаючого вікна. Це дозволить локалізувати місце порівняння траєкторій у межах одного вікна і знаходити відхилення в заданих межах. Для цього вікно вздовж траєкторії руху БПЛА зсувається від позиції до позиції і в кожній позиції відбувається відбір *R*-зображень з геотегами (*R* – розмір вікна).

На рис. 1 ковзаючі вікна зображені у вигляді чотирикутників, що фіксують напрям траєкторії.

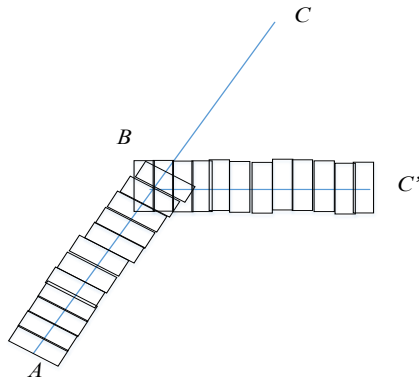


Рис. 1. Приклад заданих траєкторій руху БПЛА з хибною траєкторією (Fig. 1. Example of given UAV trajectories with the wrong trajectory)

У кожному вікні можна виділити дві субтраєкторії БПЛА. Перша – вилучена з позиції *GPS*, друга – із зображень, отриманих за допомогою засобів візуальної одометрії. У разі відсутності спуфінгу ці субтраєкторії співпадатимуть. Шляхом порівняння цих субтраєкторій можна визначити час та місце спуфінгу БПЛА. Ці субтраєкторії можна порівняти безпосередньо, використовуючи метричну відстань, або опосередковано, використовуючи дескриптор траєкторії, який описує траєкторію вектором ознак, що відображає різні характеристики траєкторії.

1.1. Розрахунок траєкторії з використанням даних візуальної одометрії. Траєкторія об'єкта що рухається *T*, являє собою послідовність упорядкованих пар (t_i, P_i)

$$T = \{(t_1, P_1) \dots (t_n, P_n)\}, \quad (1)$$

де P_i – вектор положення точки в момент часу; n – кількість позицій в *T* чи довжина *T*.

У *i*-му положенні БПЛА та в межах W_i ковзаючого вікна БПЛА можуть бути призначені дві траєкторії завдовжки *R* (*R* – розмір вікна). Це вікно переміщається вздовж траєкторії руху БПЛА, і в кожній *i*-й позиції БПЛА будуть обрані *R* зображень з геотегами числа зображень від $i - (R-1)/2$ до $i + (R-1)/2$. В середині W_i перша субтраєкторія вилучається з *GPS*-положень від $GPS_{i-(R-1)/2}$ до $GPS_{i+(R-1)/2}$, які використовуються при геотегуванні зображень БПЛА:

$$GPST_i = \{(t_j, GPS_j) \dots (t_{j+k-1}, GPS_{j+k-1})\}; \quad (2)$$

$$j = i - (k-1)/2.$$

Позначимо траєкторію як $GPST_i$. Крім того, друга субтраєкторія розраховується на основі даних, отриманих із засобів візуальної одометрії, зокрема з використанням положення камери від $CAM_{i-(R-1)/2}$ до $CAM_{i+(R-1)/2}$. В межах ковзаючого вікна:

$$CAMT_i = \{(t_j, CAM_j) \dots (t_{j+k-1}, CAM_{j+k-1})\}; \quad (3)$$

$$j = i - (k-1)/2,$$

де $CAMT_i$ – траєкторія камери.

Слід зазначити, що формалізація траєкторії $GPST_i$ у кожному ковзаючому вікні є не складним технічним завданням, яке виконується з використанням штатних засобів моделювання.

Однак розрахунок траєкторії $CAMT_i$ з використанням даних візуальної одометрії потребує використання додаткових знань. Візуальна одометрія це процес збору та оцінки даних про тривимірну зміну положення об'єкта в просторі з використанням необхідного обладнання (камер, датчиків та ін.).

Так само слід зауважити, що у випадку візуальної одометрії відносно положення камери можна оцінити або за допомогою характеристик зображення або на основі функціонально-орієнтованого методу.

Оцінюючи положення камери на основі характеристик зображення найчастіше використовуються значення інтенсивності оптичного потоку [14]. Оцінюючи з урахуванням функціонально-орієнтованого методу окремі особливості зображення виділяються і фіксуються описом. Потім цей опис використовується для порівняння точок та оцінки відносного положення між двома зображеннями [15]. У методі, що розробляється, пропонується за основу взяти дані про відносну субтраєкторію польоту БПЛА. При цьому для їх розрахунку використати підхід монокулярної візуальної одометрії. Для розрахунку та опису точкових об'єктів зображення, а також їх зіставлення з відповідними точками пропонується використовувати оператор масштабно-інваріантного перетворення елемента. Для обчислення $CAMT_i$ всередині кожного ковзаючого вікна необхідно оцінити відносну орієнтацію $R_{j,j+1}, B_{j,j+1}$, а також параметри між послідовними зображеннями I_j та I_{j+1} , $R_{j,j+1}$ представляє собою матрицю відносного повороту камери з позиції $j+1$ в позицію j , а $B_{j,j+1}$ – вектор відносного положення камери від позиції $j+1$ в позицію j . На рис. 2 представлена структура векторів, що описують положення БПЛА у просторі.

Після закінчення зазначених дій відносні положення камери в межах ковзаючого вікна фіксуються і перетворюються на систему координат моделі зображення відповідно до виразів:

$$\begin{aligned} CAM_j &= 0; j = p - (k-1)/2; \\ CAM_j &= B_{j-1,j}; j = p+1; \\ CAM_j &= CAM_{j-1} + Y_{p,j-2} X_{p,j-2} B_{j-1,j}; \\ p+2 &\leq j \leq i + (k-1)/2; \\ Y_{p,j-2} &= \varphi_{p,p+1} \dots \varphi_{j-2,j-1}; \\ X_{p,j-2} &= R_{p,p+1} \dots R_{j-2,j-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

де CAM_j – вектор положення *j*-го зображення в ковзаючому вікні; $\varphi_{j-2,j-1}$ – коефіцієнт масштабування перетворення відстані з тривимірної моделі *j* – 1 в тривимірну модель *j* – 2; $R_{j-2,j-1}$ – матриця відносного повороту камери з позиції *j* – 1 у позицію *j* – 2; $Y_{p,j-2}$ – коефіцієнт масштабування перетворення відстані з

тривимірної моделі $j-2$ в першу тривимірну модель $j = p$; $X_{p,j-2}$ – матриця відносного повороту камери з позиції $j-2$ на першу позицію $j = p$.

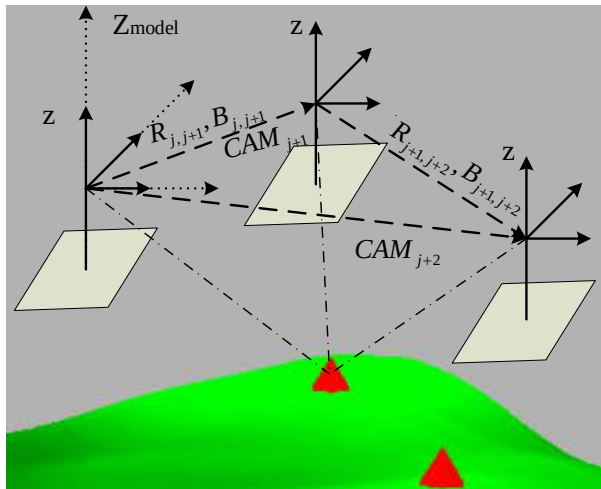


Рис. 2. Структура векторів, що описують положення БПЛА у просторі (Fig. 2. The structure of vectors describing the position of the UAV in space)

Одним з основних недоліків використання даних візуальної одометрії (особливо отриманих протягом тривалого часу) це сукупна похибка в оцінці положення камери. Ця похибка призводить до відхилення розрахункової траєкторії від реальної. Ця похибка збільшується зі збільшенням довжини траєкторії. Використання підходу ковзаючого вікна при оцінці основних показників зображення та розрахунку субтраєкторій БПЛА $CAMT_i$ дозволяє зменшити цю похибку.

1.2. Перетворення координат. Використовуючи для виявлення атаки спуфінгу БПЛА даних порівняння, $GPST_i$ і $CAMT_i$ необхідно враховувати фактор відмінності систем координат цих субтраєкторій. Відповідно перед їх порівнянням виникає необхідність в узгодженні даних про ці субтраєкторії та переведення їх в одну систему координат.

$GPST_i$ найчастіше представляється в наземній системі координат, наприклад $WGS 84$ (World Geodetic System – являє собою астрономо-геодезичну-гравіметричну систему відліку, вписану у фігуру

землі) або UTM (Universal Transverse Mercator – система картографічних проєкцій, в якій поверхня Землі розділена на 60 витягнутих у меридіональному напрямку зон шириною 6 градусів). $CAMT_i$ оцінюється в системі координат моделі тривимірних зображень усередині ковзаючого вікна.

Ці системи координат мають різний початок, масштаб та орієнтацію осей.

За основу, як зразок, у роботі пропонується брати систему планіметричного позиціонування за допомогою GPS . У ковзаючому вікні система координат $GPST_i$ перетворюється на систему $CAMT_i$ з використанням двовимірної конформної моделі:

$$TGPST_i = X_0 + \rho R(\varphi) GPS_j, \quad (5)$$

де φ – кут повороту, ρ – масштабний коефіцієнт, X_0 – вектор трансляції системи координат $GPST_i$ відносно системи координат $CAMT_i$.

У виразі (5) $TGPST_i$ – це перетворений вектор положення GPS_i у виразі (2). Для отримання φ , ρ та X_0 використовувалися відповідні координати першого і останнього зображення в межах ковзаючого вікна від GPS і засобів візуальної одометрії. Після перетворення $GPST_i$ трансформується $TGPST_i$:

$$TGPST_i = \{(t_j, TGPST_j), \dots, (t_{j+k-1}, TGPST_{j+k-1})\}; \quad (6)$$

$$j = i - (k - 1)/2.$$

Для підвищення точності даних векторів положення БПЛА в умовах просторового переміщення (Его-переміщення) доцільно використовувати додаткові методи та інструменти, зокрема методи штучного інтелекту. З цією метою в роботі пропонується вдосконалий метод інтелектуальної оцінки оптичного потоку та формування дескрипторів з використанням рекурентних згорткових нейронних мереж.

1.3. Оцінка оптичного потоку та формування дескрипторів з використанням рекурентних згорткових нейронних мереж. Для оцінки оптичного потоку та формування дескрипторів «Переміщення» БПЛА, а також прийняття рішення про атаку спуфінгу, у роботі пропонується використовувати мережеву структуру на основі рекурентних нейронних мереж. Структура методу проілюстровано на рис. 3.

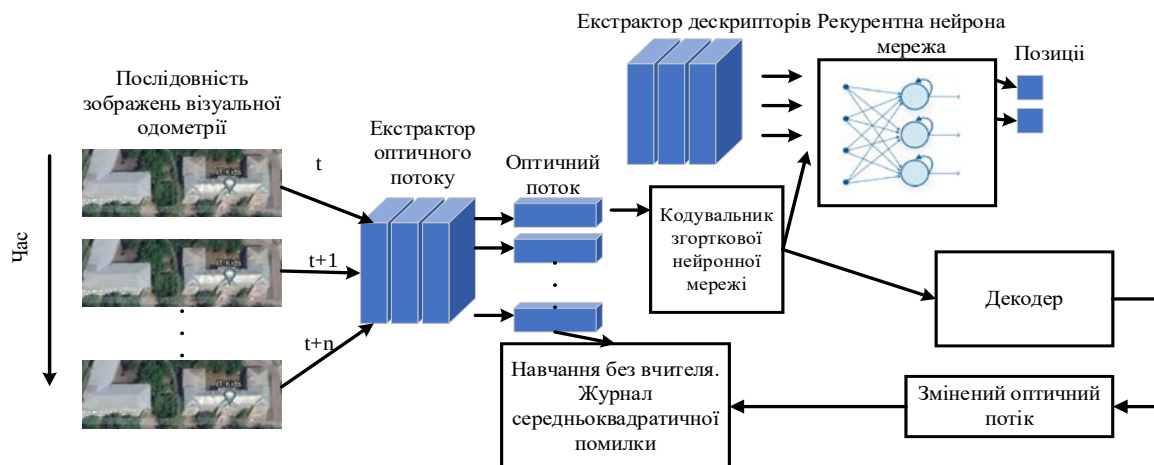


Рис. 3. Структура методу оцінки «Переміщення» з використанням рекурентних згорткових нейронних мереж (Fig. 3. The structure of the method of estimating "Movement" using recurrent convolutional neural networks)

Розглянемо докладніше представлений метод. У першій частині схеми пропонується використовувати мережу *PWC-Net*, запропоновану *NVIDIA Corporation* [16], щоб згенерувати поле оптичного потоку для послідовних пар коваючих зображень. *PWC-Net* – це компактна та ефективна модель згорткової нейронної мережі для оцінки поля оптичного потоку. Наступною сполучною ланкою представленої схеми є кодувальник та декодер оптичного потоку. Кодер повинен вивчити приховане представлення оптичного потоку та виконати генерацію його. Декодер з архітектурою, що є зворотньою кодувальнику, повинен відновлювати поле оптичного потоку так щоб кодер можна було навчати окремо неконтрольованим чином. Процес кодування та декодування показаний на рис. 4.

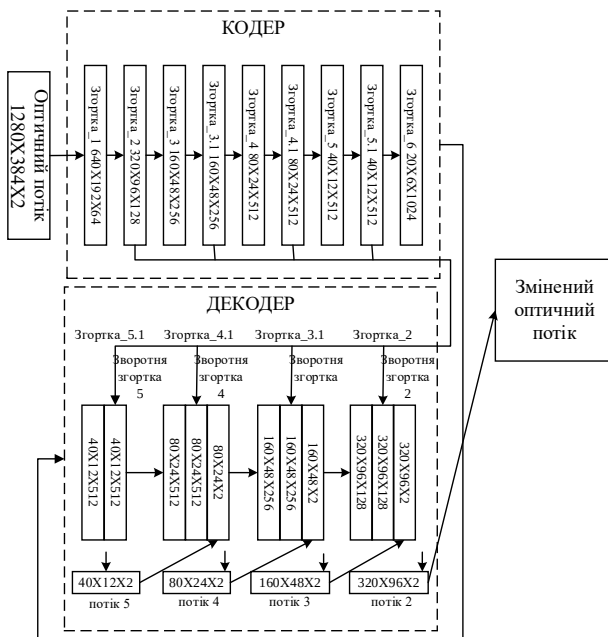


Рис. 4. Структурна схема процесу кодування та декодування (Fig. 4. Block diagram of the encoding and decoding process)

Кодер складається з 9 згорткових шарів, за кожним з яких слідує функція активації *Rectified Linear Unit (ReLU)*. Для ініціалізації використовується метод *Xavier*. Кодер генерує підпростір оптичного потоку з 1024 каналами, кожен з роздільною здатністю 20×6 . Потім підпростір оптичного потоку відновлюється в декодері з чотирма рівнями декодування, за кожним з яких слідує операція підсумовування та підвищення дискретизації. Візьмемо приклад першого рівня декодування, шар «Зворотня згортка 5» деконволюціонує тензор ($20 \times 6 \times 1024$), створений «Згортка_6», і генерує новий тензор розміром $40 \times 12 \times 512$. Потім він складається з тензором, згенерованим шаром «Згортка_5.1» розміром $40 \times 12 \times 512$, для генерації нового тензора розміром $40 \times 12 \times 1024$. При цьому використовується згортковий шар "потік 5", щоб згенерувати відновлений оптичний потік ($40 \times 12 \times 2$). Відновлений оптичний потік піддається підвищуючій дискретизації за допомогою білінійної інтерполяції для використання на наступному рівні декодування. З використанням чотирьох рівнів декодування підпростір оптичного потоку відновлюється

до вихідного поля оптичного потоку. Під час навчання кодувальника використовується відновлене поле оптичного потоку як контрольний сигнал і порівнюється з вихідним полем оптичного потоку, згенерованого моделлю *PWC-Net*.

Слід зазначити, що у цьому використовуються піксельні квадрати втрат *RMSLE* для представлення перепусток. Функція втрат визначається як:

$$f_{nom} = \sum_i \left\| \log(\hat{\phi}^{(i)} + 1) - \log(\phi^{(i)} + 1) \right\|_2^2, \quad (7)$$

де $\hat{\phi}^{(i)}$ та $\phi^{(i)}$ – відновлений вектор оптичного потоку i -го пікселя та вектор вхідного оптичного потоку.

Після кодувальника згорткової нейронної мережі, наступний елемент схеми – глибока рекурентна нейронна мережа. Вона призначена для проведення послідовного навчання, тобто для моделювання динаміки та відносин між послідовністю підпростору оптичного потоку. Рекурентна нейронна мережа в даний час є кращою мережею для обробки даних часових рядів і широко використовується в багатьох галузях [17]. У роботі використовується мережа з довгою короткостроковою пам'яттю (*LSTM*), яка здатна досліджувати довгострокові залежності. Таким чином, розроблений метод оцінки «Его-переміщення» з використанням рекурентних згорткових нейронних мереж, відмінною особливістю якого є комплексне використання рекурентних згорткових нейронних мереж при дослідженні малорозмірного простору оптичного потоку та дескрипторів гістограми напрямку переміщення БПЛА, що дозволило врахувати особливості «Его-переміщення».

1.4. Порівняння субтраєкторій камери та GPS. Для оцінки значень даних двох субтраєкторій необхідно визначитися з додатковим показником порівняння. У роботі пропонується використовувати показник суми евклідових відстаней між відповідними точками $CAMT_i$ та $TGPST_i$. Аналітичний вираз для розрахунку суми евклідових відстаней між точками траєкторії є таким:

$$COPMPR(CAMT_i, TGPST_i) = \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} d(TGPS_j, CAM_j), \quad (8)$$

де $d(TGPS_j, CAM_j)$ – евклідова відстань між CAM_j та $TGPS_j$. На рис. 5 представлена ілюстрація евклідова відстані між відповідними точками CAM_j та $TGPS_j$ в межах коваючого вікна з п'яти точок. На цьому рисунку точка C' є початковою точкою спуфінгу БПЛА і точкою його перенаправлення в результаті GPS спуфінгу, що записується в $CAMT_i$. Евклідову відстань можна використовувати як інструмент прямого порівняння CAM_j і $TGPS_j$. У той же час для непрямого порівняння можна використовувати кутову відстань та таксономічну відстань між дескрипторами траєкторій (гістограма напрямку переміщення $CAMT_i$ та $TGPST_i$). Дескриптор траєкторії гістограми напрямку переміщення являє собою структуру формалізації даних в комірки якої записується величина зміщення об'єкта, що рухається, в різних напрямках від 0° до 360° . Величина числа інтервалів гістограми визначає кутовий дозвіл гістограм, відповідно до виразу:

$$PM = 360^\circ / NI, \quad (9)$$

де PM – кутовий дозвіл гістограми, NI – величина кількості інтервалів гістограми.

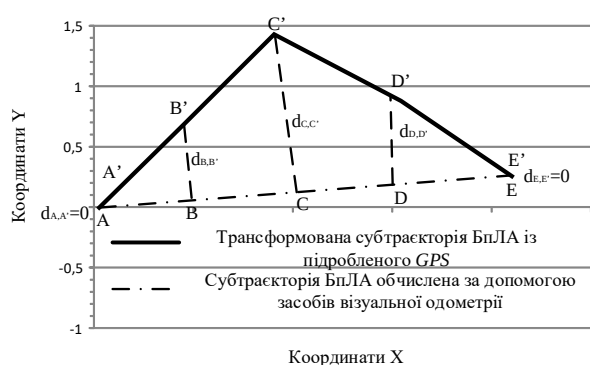


Рис. 5. Ілюстрація евклідова відстані між відповідними точками CAM_i та $TGPS_i$ в межах ковзаючого вікна з п'яти точок (**Fig. 5.** Illustration of the Euclidean distance between the respective CAM_i and $TGPS_i$ points within a five-point sliding window)

Приклад такої оцінки кутового дозволу у вигляді ілюстрації гістограми напрямку переміщення при $NI = 8$ представимо на рис. 6.

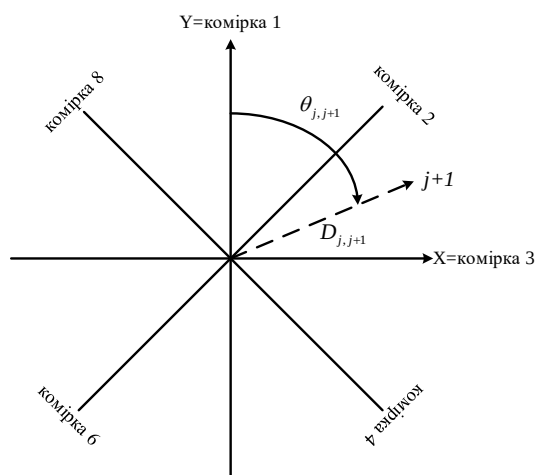


Рис. 6. Приклад дескрипторів траєкторії гістограми напрямку переміщення з вісьма комітками, відстань $D_{j,j+1}$ ділиться між двома найближчими комітками щодо кута $\theta_{j,j+1}$ (**Fig. 6.** Example of descriptors of the trajectory of the histogram of the direction of movement with eight cells, the distance $D_{j,j+1}$ is divided between the two nearest cells relative to the angle $\theta_{j,j+1}$)

Скористаємося відомою методикою, описаною в роботі [18]. Відповідно до даної методики розрахунку відстані $D_{j,j+1}$ спільно з азимутальним кутом $\theta_{j,j+1}$ є основними складовими при оцінці гістограми напрямку переміщення,

$$\theta_{j,j+1} = a \tan 2^{-1} \left(\frac{(x_{j+1} - x_j)(y_{j+1} - y_j)}{D_{j,j+1}} \right), \quad (10)$$

при цьому частка комірки обчислюється як:

$$\alpha = D_{j,j+1} \left(1 - \left(\left| \theta_{j,j+1} \right| / PM - (NI - 1) \right) \right). \quad (11)$$

Дві найближчі комірки гістограми обчислюються відповідно до виразів:

$$NI1 = \left\lfloor \theta_{j,j+1} / PM \right\rfloor + 1, \quad (12)$$

$$NI2 = NI1 + 1. \quad (13)$$

Для порівняння CAM_j і $GPST_j$ з дескрипторами гістограми напрямку переміщення виникає потреба у перетворенні та адаптації $GPST_j$ до системи координат CAM_j . Для цього автори [18] пропонують дві міри відмінності та адаптації:

1. Кутова відстань між дескрипторами гістограм напрямку переміщення:

$$\beta(a, b) = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{\langle a | b \rangle}{\|a\| \|b\|} \right), \quad (14)$$

2. Таксономічна відстань між дескрипторами гістограм напрямку переміщення:

$$\chi(a, b) = \sum_{i=1}^{p=NI} |a_i - b_i|, \quad (15)$$

де a та b – відповідно дескриптори гістограми напрямку переміщення траєкторій CAM_j та $TGPS_j$; a_i та b_i – i -ті компоненти a та b .

2. Дослідження розробленого методу виявлення спуфінгу БПЛА

Для дослідження та оцінки ефективності запропонованого методу виявлення спуфінгу БПЛА було використано 50 фотографій території Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». На рис. 7 показаний один з фотознімків та лінії польоту БПЛА, що використовуються при реалізації різних сценаріїв кібератаки. На рис. 8 представлені два послідовні зображення набору даних.

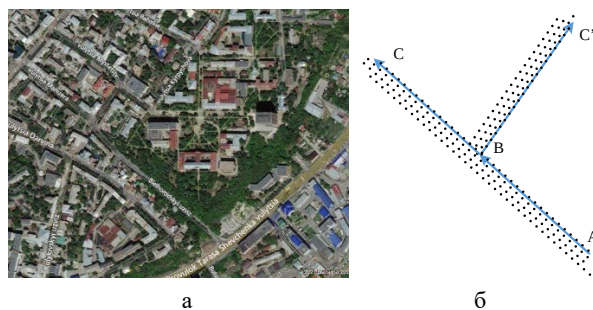


Рис. 7. Супутникове фотозображення

Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (а) та лінії польоту БПЛА за представленим на фотозображенні маршрутом (б) (**Fig. 7.** Satellite photo image of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (a) and UAV flight lines along the route (b) shown in the photo image)



Рис. 8. Стереозображення

Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» з висоти польоту БПЛА (**Fig. 8.** Stereo image of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" from the height of the UAV)

У ході дослідження виконано імітаційне моделювання справжніх та хибних траєкторій БПЛА (рис. 7, б). На рис. 9 схематично представлений перший сценарій спуфінгу БПЛА. Зображення та координати GPS на заздалегідь визначених та хибних траєкторіях вибираються відповідно до лінії польоту. З рис. 10 видно, що спочатку певна траєкторія польоту БПЛА (траєкторія AC) була перервана активним спуфінгом у точці B. При цьому БПЛА був перенаправлений в точку C'. Передбачалося, що у сегменті польоту AB не відбувалося аномальних подій спуфінгу. Виходячи з цього, попередньо задана траєкторія польоту БПЛА і справжня траєкторія імітації БПЛА співпадають на цій ділянці. У кожному ковзаючому вікні W_i , GPS-положення зображень БПЛА з геотегами використовувалися для побудови $GPST_i$, а відповідні зображення використовувалися для побудови $CAMT_i$. Після атаки спуфінгу в точці B, вимірювання GPS під час польоту БПЛА над лінією BC' повинні демонструвати лінію BC. Отже, положення GPS лінії BC повинні представлятися підрозбитим розташуванням GPS в лінії BC'.

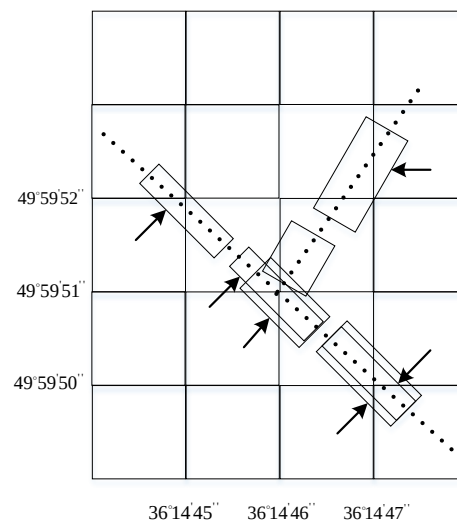


Рис. 9. Схема першого сценарію спуфінгу БПЛА (Fig. 9. Scheme of the first UAV spoofing scenario)

На рис. 10 наведені графіки залежності показників виявлення спуфінгу (β , χ , $COPMPR$) від значень позиції зображення.

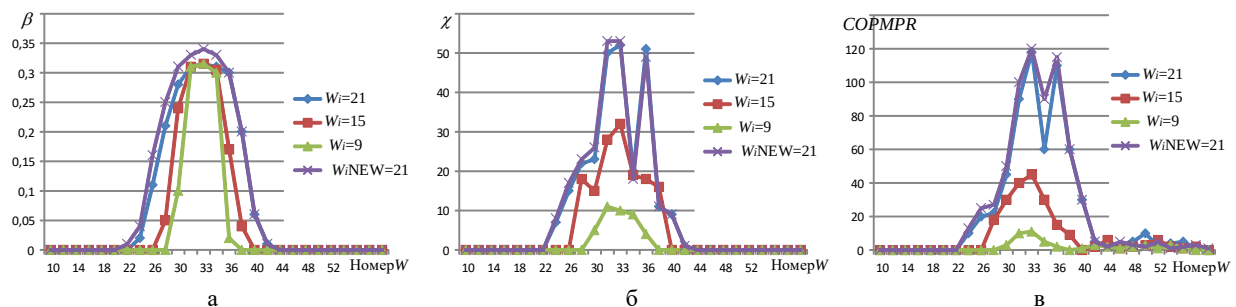


Рис. 10. Графіки залежності показників виявлення спуфінгу (β , χ , $COPMPR$) від значень позиції зображення (Fig. 10. Graphs of dependence of spoofing detection indicators (β , χ , $COPMPR$) on image position values)

Як видно із рис. 10, а при збігу позиції зображення, отриманого від засобів візуальної одометрії, з позиціями GPS у ковзаючому вікні показник β кутової відстані між дескрипторами гістограми напрямку переміщення близький до нуля. Однак при досягненні вікна з номером 27 і введенням першого підрозбитого GPS-положення у вікно значення показника спуфінгу β починає зростати. Максимальна різниця між $CAMT_i$ та $GPST_i$ спостерігається в межах ковзаючого вікна 33. Після проходження певного вікна (наприклад це ковзаюче вікно 41) β знову стає близьким до нуля, так як у цих позиціях $CAMT_i$ збігається з $TGPST_i$. Результати досліджень показників χ і $COPMPR$ показують їх значну залежність від величини ковзаючого вікна. При цьому дані показники також вказують на позицію 33 як точку виявлення спуфінгу. Використання розробленого методу оцінки оптичного потоку та формування дескрипторів з використанням рекурентних згорткових нейронних мереж дозволило до 3% підвищити точність оцінки помилкових GPS-положень БПЛА. Це особливо помітно на рис. 10, а при використанні показника β кутової відстані між дескрипторами гістограми спрямування переміщення. Кількість помилкових GPS-положень,

що фіксуються розробленим методом виявлення спуфінгу БПЛА з використанням засобів візуальної одометрії, наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Кількість помилкових GPS-положень, що фіксуються методом виявлення спуфінгу БПЛА з використанням засобів візуальної одометрії

	$COPMPR$	β	χ
$W = 9$	30	13	16
$W = 15$	31	19	21
$W = 21$	32	25	27
$W_{NEW} = 21$	33	28	28

Представлені результати демонструють практично 100% показник виявлення помилкових GPS-положень за допомогою $COPMPR$. Це обґрунтовується більшою чутливістю $COPMPR$ до невеликих змін швидкості БПЛА внаслідок спуфінгу.

Ще один сценарій спуфінгу БПЛА графічно зображено на рис. 11. Відмінною особливістю цього сценарію порівняно з попереднім є заздалегідь задана траєкторія БПЛА, яка представляє собою криву лінію. При цьому напрям у початковій траєкторії змінюється поступово з інтенсивністю 1° від одного положення зображення до іншого.

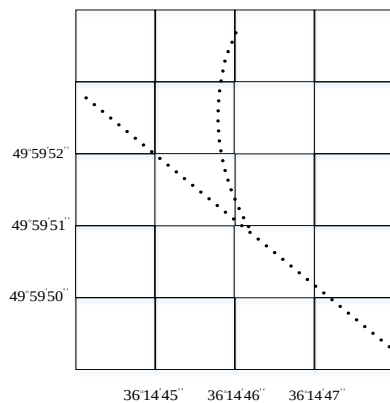


Рис. 11. Схема другого сценарію спуфінгу БПЛА
(Fig. 11. Scheme of the second UAV spoofing scenario)

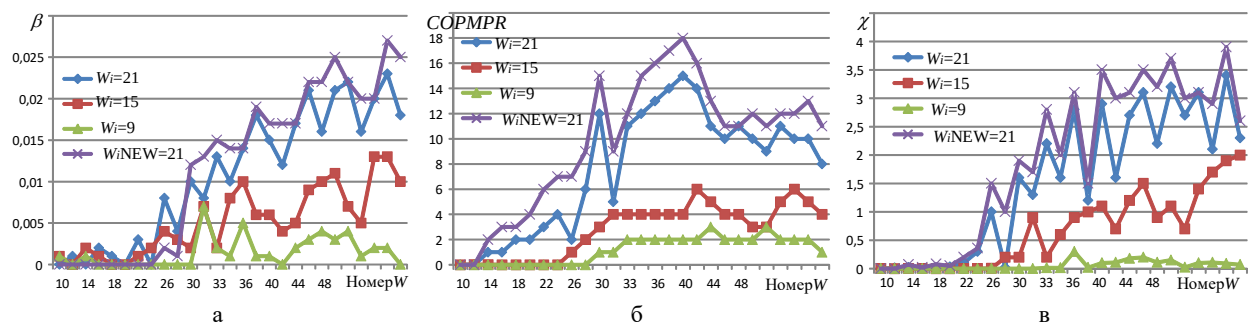


Рис. 12. Графіки залежності показників виявлення спуфінгу (β , χ , $COPMPR$) від значень позиції зображення під час використання другого сценарію (Fig. 12. Graphs of dependence of spoofing indicators (β , χ , $COPMPR$) on the values of the image position when using the second scenario)

Висновки

Таким чином, розроблено метод виявлення спуфінгу БПЛА на основі інтелектуальної оцінки оптичного потоку та обробки даних візуальної одометрії. Відмінною особливістю методу є використання технології розрахунку субтраєкторії $CAMT_i$ на основі субтраєкторій візуальної одометрії та $GPST_i$ з GPS-положень у ковзаючому вікні з урахуванням інтелектуальної оцінки оптичного потоку та формування дескрипторів «Его-переміщення» БПЛА. В якості порі-

Результати реакції показників спуфінгу на зміни траєкторій представлені на рис. 12.

Як видно з рисунку, всі досліджувані показники спуфінгу при величинах ковзаючого вікна від 15 і вище дають можливість оцінки активних кібератак на БПЛА. При цьому кількість виявлених помилкових GPS-положень вище за використання показників $COPMPR$ та χ . У той же час використання розробленого методу оцінки оптичного потоку та формування дескрипторів з використанням рекурентних згорткових нейронних мереж дозволило до 5% підвищити точність оцінки помилкових GPS-положень БПЛА. Це особливо помітно на рис. 12 (в) при використанні показника $COPMPR$ суми евклідових відстаней між точками траєкторії.

вияння показників спуфінгу було запропоновано використання заходів β , χ та $COPMPR$. Результати експерименту для двох сценаріїв спуфінгу показали ефективність оцінки положень принаймні двох з трьох показників (χ та $COPMPR$), в умовах використання ковзаючих вікон розміром від 15 і вище, з часовою затримкою, що становить половину розміру вікна. Крім того, показано, що використання інтелектуального методу оптичного потоку та формування дескрипторів з використанням рекурентних згорткових нейронних мереж.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ (REFERENCES)

1. Jafarnia-Jahromi, Ali, Broumandan, Ali, Nielsen, J. & Lachapelle, G. (2012), "GPS Vulnerability to Spoofing Threats and a Review of Antispoofing Techniques", *Int. Journal of Navigation and Observation*, doi: <https://doi.org/10.1155/2012/127072>.
2. Lawal, A.B. (2020), How to Design GPS/GNSS Receivers Books 2, 3, 4 & 5, URL: https://books.google.com.ua/books?id=RXANEAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbg_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false.
3. Shepard, D.P.; Bhatti, J.A.; Humphreys, T.E. & Fansler, A.A. (2012), "Evaluation of smart grid and civilian UAV vulnerability to GPS spoofing attacks", *Radionavigation Laboratory Conf. Proc.*, The University of Texas at Austin: Austin, TX, USA,.
4. Kerns, A.J.; Shepard, D.P.; Bhatti, J.A.; Humphreys, T.E. Unmanned Aircraft Capture and Control Via GPS Spoofing. *J. Field Robot.* 2014, 31, 617–636.
5. He, D., Qiao, Y., Chen, S., Du, X., Chen, W., Zhu, S. and Guizani, M. (2019), "A Friendly and Low-Cost Technique for Capturing Non-Cooperative Civilian Unmanned Aerial Vehicles", *IEEE Netw.*, 33, pp. 146–151.
6. Guo, Y., Wu, M., Tang, K., Tie, J. and Li, X. (2019), "Covert Spoofing Algorithm of UAV based on GPS/INS Integrated Navigation", *IEEE Trans. Veh. Technol.*
7. Broumandan, A.; Jafarnia-Jahromi, A.; Daneshmand, S.; Lachapelle, G. (2016), "Overview of Spatial Processing Approaches for GNSS Structural Interference Detection and Mitigation", *Proc. IEEE*, 104, pp. 1246–1257.
8. Milaat, F.A. and Liu, H. (2018), "Decentralized Detection of GPS Spoofing", *IEEE Commun. Lett.*, 22, pp. 1256–1259.
9. Sun, C.; Cheong, J.W.; Dempster, A.G.; Zhao, H.; Demicheli, L.; Feng, W. A (2018), "New Signal Quality Monitoring Method for Anti-spoofing", *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2018 Proceedings*, Springer, Singapore, pp. 221–231.
10. Humphreys, T., Bhatti, J. and Ledvina, B. (2010), "The GPS Assimilator: A method for upgrading existing GPS user equipment to improve accuracy, robustness, and resistance to spoofing", *Radionavigation Laboratory Conference Proceedings*, Proceedings of the ION GNSS Conference, Portland, OR, USA, The University of Texas at Austin: Austin, TX, USA,.

11. Oligeri, G., Sciancalepore, S., Ibrahim, O.A. and Pietro, R.D. (2019), "Drive me not: GPS spoofing detection via cellular network: (architectures, models, and experiments)", *Proc. of the 12th Conf. on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks, Miami, FL, USA*, pp. 12–22.
12. Qiao, Y., Zhang, Y. and Du, X. A. (2017), "Vision-Based GPS-Spoofing Detection Method for Small UAVs", *Proceedings of the 2017 13th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS)*, Hong Kong, China, pp. 312–316.
13. Chowdhary, G., Johnson, E.N., Magree, D., Wu, A. and Shein, A. (2013), "GPS-denied indoor and outdoor monocular vision aided navigation and control of unmanned aircraft", *J. Field Robot*, 30, pp. 415–438.
14. Gonzalez, R.; Rodriguez, F.; Guzman, J.L.; Pradalier, C. and Siegwart, R. (2012), "Combined visual odometry and visual compass for mobile robots localization", *Robotica*, 30, pp. 865–878.
15. Scaramuzza, D. and Siegwart, R. (2008), "Appearance-Guided Monocular Omnidirectional Visual Odometry for Outdoor Ground Vehicles", *IEEE Trans. Robot*, 24, pp. 1015–1026.
16. Sun, Deqing, Yang, Xiaodong, Liu, Ming-Yu & Kautz, Jan (2018), PWC-Net: CNNs for Optical Flow Using Pyramid, Warping, and Cost Volume", *2018 IEEE/CVF Conf. on Comp. Vision and Pattern Recognition*, pp. 8934–8943.
17. Gerardus, Blokdyk (2018), *Recurrent neural network: Real Life Actions Paperback*, 132 p.
18. Varshosaz, Masood, Afary, Ali Reza, Mojaradi, Barat, Saadatseresht, Mohammad & Ghanbari Parmehr, Ebadat (2019), "Spoofing Detection of Civilian UAVs Using Visual Odometry", *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9, doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi9010006>.

Received (Надійшла) 01.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 05.01.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ ABOUT THE AUTHORS

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

Denys Voloshyn – graduate student of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: ultrageron@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1077-9658>.

Бульба Сергій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Обчислювальна техніка та програмування", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Serhii Bulba – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: bssserrega@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0358-7516>.

Интеллектуальный метод определения спуфинга БПЛА

Д. Г. Волошин, С. С. Бульба

Аннотация. В работе представлен интеллектуальный метод обнаружения спуфинга БПЛА. Отличительной особенностью метода является использование технологии расчета субтраектории на основе субтраекторий визуальной одометрии и GPS-положений в скользящем окне с учетом интеллектуальной оценки оптического потока и формирования дескрипторов «Эго-перемещения» БПЛА. В ходе исследования проведен анализ и сравнительные исследования широкого спектра методов спуфинга БПЛА, выявлены наиболее часто рекомендованные и практически используемые методы. Сделан вывод об актуальности проблематики GPS-спуфинга. Проведен анализ методов защиты от GPS спуфинга БПЛА. Выявлены перспективные направления интеллектуального обнаружения спуфинга БПЛА с использованием методов и средств визуальной одометрии. В ходе исследования методов фиксации входных данных предложен подход оценки оптического потока с использованием скользящего окна. При этом аргументировано доказана необходимость интеллектуальной обработки входных данных. Оценка оптического потока и формирование дескрипторов проводилась с использованием рекуррентных сверточных нейронных сетей. В результате разработана структурная схема метода обнаружения спуфинга БПЛА. Это позволило провести исследование разработанного метода. Результаты эксперимента для двух сценариев спуфинга показали эффективность оценки положений не менее двух из трех показателей в условиях использования скользящих окон размером от 15 и выше, с временной задержкой, составляющей половину размера окна.

Ключевые слова: спуфинг; БПЛА; скользящее окно; оптический поток; дескриптор.

Intelligent UAV Spoofing Detection Method

Denys Voloshyn, Serhii Bulba

Abstract. The paper presents an intelligent method for detecting UAV spoofing. A distinctive feature of the method is the use of subtrajectory calculation technology based on visual odometry subtrajectories and GPS positions in a sliding window, taking into account the intelligent estimation of the optical flow and the formation of UAV "Ego-movement" descriptors. In the course of the study, an analysis and comparative studies of a wide range of UAV spoofing methods were carried out, the most frequently recommended and practically used methods were identified. The conclusion is made about the relevance of the problems of GPS spoofing. The analysis of methods of protection against UAV GPS spoofing has been carried out. Promising directions for intelligent detection of UAV spoofing using methods and means of visual odometry are identified. In the course of studying methods for fixing input data, an approach was proposed for estimating the optical flow using a sliding window. At the same time, the need for intelligent processing of input data is argued. The estimation of the optical flow and the formation of descriptors was carried out using recurrent convolutional neural networks. As a result, a block diagram of the UAV spoofing detection method was developed. This allowed us to study the developed method. The results of the experiment for two spoofing scenarios showed the efficiency of estimating the positions of at least two of the three indicators under the conditions of using sliding windows of size 15 or more, with a time delay of half the window size.

Keywords: spoofing; UAV; sliding window; optical flow; handle.

Zhang Liqiang¹, Nataliia Miroshnichenko²¹ Neijiang Normal University, Neijiang, China² National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine**THE SOFTWARE SECURITY DECISION SUPPORT METHOD DEVELOPMENT**

Abstract. The actuality of the power to improve the accuracy of the results was determined in order to make a decision about the process of testing the software security. An analysis of the methods of support for making a decision was carried out. The necessity and feasibility of improving the accuracy of the results was determined in case of further software security inconsistencies in the minds of the fuzziness of input and intermediate data. With this method, on the basis of the mathematical apparatus of fuzzy logic, the method of support for making a decision about the security of software security has been developed. The main feature of this method is the synthesis of an improved method of generating the initial vibration in the process of starting a piece of neural string. Within the framework of the model, the next stages of follow-up are reached. For the mathematical formalization of the process of accepting the decision and designation of the input data, the model of forming the vector in the input data was developed. Depending on this model for shaping the input data, an anonymous sign of potential inconsistencies and undeclared possibilities of the PP is valid until the data of PVS-Studio Analysis Results. To improve the accuracy of the classification of data collected, the method of creating a piece of neural array has been improved, which is modified by the method of generating a sample, which is being developed. This generation method includes three equal generations: generation of the initial vibration, generation of the initial butt and generation of a specific value of the safety characteristic. This made it possible to increase the accuracy of classification and acceptance of the solution by 1.6 times for positive elements in the selection by 1.2 times for negative elements in the selection. To confirm the effectiveness of the development of the method of support for the decision on how to ensure software security, a ROC-analysis was carried out over the course of the above procedures. The results of the experiment confirmed the hypothesis about the efficiency of the divided method of support to make a decision about the security of PZ up to 1.2 times equal to the methods, which are based on the position of discriminant and cluster analysis.

Keywords: software security inconsistency; security testing; decision support; fuzzy logic; cyberthreat.

Problem statement and literature analysis

Studies of the scheme for software vulnerability research and evaluation of the results of mathematical modeling allow to conclude that the data analyzed in the system for confirming potential vulnerabilities is complex [1, 2]. In this case, the summary security indicator of the software the object under study F_{sec} can be represented as a sequence of the following data:

- vector $F_{sec}=(f_1,...,f_m)$ of initial characteristics of the composition of potential vulnerabilities, and also a list of vulnerabilities and undeclared capabilities, for a complete, comprehensive assessment of the security of the objects under study;
- vector $Y_{spec}=(y_1,...,y_m)$ of individual indicators representing functions $Q=q(f_i;i)$, $i=1,...,m$, of the corresponding initial characteristics and evaluate the object under study using m different criteria;
- function $X(Y_{spec})$, that compares the vector of individual indicators $Y_{spec}=(y_1,...,y_m)$ with a summary assessment (summary indicator) $X=X(Y_{spec})$, characterizing the object under study in terms of compliance with the stated security requirements.

The assessment is based on the security vector, which combines many characteristics of the composition of potential vulnerabilities, and also a list of vulnerabilities and undeclared features that show the degree of compliance of the software with a certain security criterion and the encoded value of the compliance control level [3, 4]. Based on the features of the chosen mathematical apparatus, the solution of the verification problem must be reduced to solving the following subtasks:

1. Definition of the initial vector F_{sec} .

2. Calculation of the classification features of the vector Y_{spec} .

3. Choice of decision-making method X .

The developed method should ensure the formation of correct output signals in the entire space of the composition of potential vulnerabilities, and also a list of vulnerabilities and undeclared capabilities F_{sec} .

1. Scheme of a method to support decision making on software security

The software security decision support method can be represented as a combination of three stages: initial data preparation, intellectual processing, and decision making. The sequence of stages is shown schematically in Fig. 1.

At the stage of preparing the initial data, a vector of software security characteristics is formed, which includes the TOP 20 composition of potential vulnerabilities and also a list of vulnerabilities and undeclared capabilities.

At the stage of intellectual processing, the previously obtained vector of characteristics of potential vulnerabilities and also the list of vulnerabilities and undeclared capabilities is processed using an artificial neural network. The result of this processing is the classification vector Y_{spec} , on the basis of which the final decision is made on the compliance of the software with security requirements at the third stage.

2. Model for the formation of input data vectors

The initial data for the decision-making method is a set of characteristics of potential vulnerabilities $V1$ and also a list of vulnerabilities and undeclared capabilities $V2$:

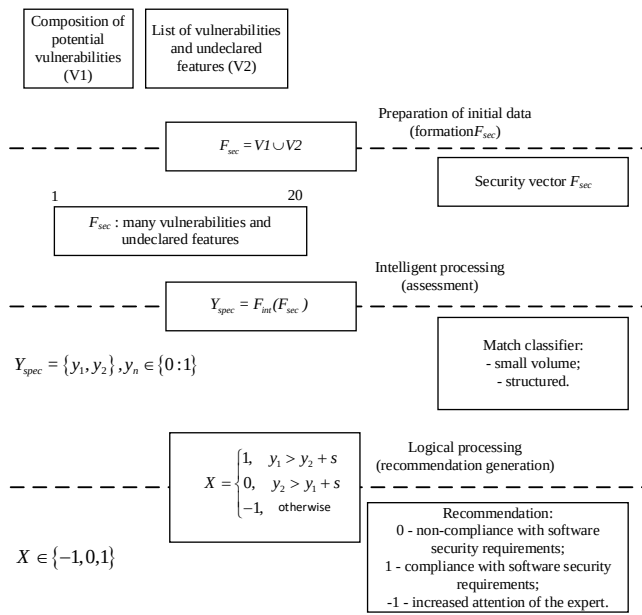


Fig. 1. Scheme of a method to support decision making on software security

$$F_{sec} = V1 \cup V2. \quad (1)$$

The TOP 25 CWE lists provide data on the assessment of the potential danger of software vulnerabilities that change, and are statistically evaluated every year by MITER specialists [5]. These scores are distributed, accompanied by signs of potential vulnerabilities and undeclared features of programming languages distributed across classes.

At the same time, it is advisable to take into account the specifics of the apparatus of neural networks. In particular, to reduce the probability of misclassification, the requirement of linear separability of the input data must be met [6].

Vector F_{sec} contains a union of all signs of potential vulnerabilities and undeclared features, distributed across classes of programming languages. From the statistical data published in the articles by PVS-Studio Analysis Results [7], signs of potential vulnerabilities and undeclared features can be distinguished. Their list is presented in Table 1.

It should be noted that in Table 1, a limited set of features is presented. The full set of features is presented in the MITER reports. The number and essence of features can be updated over time. Presented in Table 1 data correspond to the statistics of 2021.

Table 1 – List of signs of potential vulnerabilities and undeclared software features according to PVS-Studio Analysis Results

№	ID	Description
1	V512	Potential error related to filling, copying or comparing memory buffers
2	V557	Potentially possible memory access outside the array
3	V582	Potential error when working with a fixed size container
4	V645	Potential error related to string concatenation
5	V3106, V6025	Index out of range
6	V5610	Potentially corrupted data that can be used to execute a malicious script
7	V739	EOF constant is compared to a variable of type 'char' or 'unsigned char'
8	V781	At the beginning, the value of the variable is used as the size or index of the array. And then this value is compared with 0 or with the size of the array.
9	V1010, V5009	Use of data obtained from outside without prior verification
10	V1024	Possible use of incorrect data when reading them
11	V5608	Creation of an SQL command from data received from an external source without prior validation
12	V623	Possible error when working with a ternary operator '?:'
13	V723	The function returns a pointer to the internal string buffer of the local object
14	V758	Detection of a link that may become invalid
15	V774	Using a pointer that points to a freed area of memory
16	V1017	Detecting the initialization of an instance of a class 'std::string_view' temporary object or assignment to an instance of a class 'std::string_view' a temporary object
17	V629	Detection of a potential error in an expression containing a shift operation
18	V683	Detecting a potential error in a loop
19	V1028	Detection of suspicious type casting. The result of a binary operation on 32-bit is converted to a 64-bit type
20	V5305	Detection in the code of data that may be confidential
21	V3125	Detection of a potential bug that could lead to null reference access

Thus, when conducting a static software analysis, as part of the certification procedure, 20 features can be used, and the result of the initial data preparation stage is a vector F_{sec} containing 20 elements

$$F_{sec} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}, \quad v_2 = \{1, 0\}, \quad (2)$$

where n - number of evaluated security features.

After the vector of security characteristics of the studied software is formed, it is necessary to evaluate its compliance with the stated requirements on the basis of this vector, i.e. determine which security class it belongs to.

The result of evaluating the security characteristics is the classifier Y_{spec} , that includes two elements (3):

- y_1 shows the degree of compliance with the stated requirements;
- y_2 shows the degree of non-compliance with the stated requirements.

$$Y_{spec} = \{y_1, y_2\}, y_n \in \{0:1\}. \quad (3)$$

Vector F_{sec} is an j -th prototype (i.e. separate implementation) m - dimensional random vector

$V1 \cup V2$, to be classified by a multilayer perceptron. Each i -th of the K possible classes of vulnerabilities to which the given input signal belongs, denote C_i . Let $y_i^{(j)}$ – i -th output of the network generated in response to the prototype v_i :

$$y_i^{(j)} = F_i(v_j), \quad i=1,2,\dots,K, \quad (4)$$

where $F_i(\cdot)$ – a function that determines the mapping that the neural network learns when passing the input example to the i -th input.

Therefore, the decision rule R , used to classify the inputs of the network, after its training should be based on the value of the vector function:

$$F : R^{(m)}_v \rightarrow y \in R^K. \quad (5)$$

In general, about a vector function $F(\cdot)$ it can be fixed that this is a continuous function minimizing the empirical risk functional:

$$G = \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N \|d_j - F(v_j)\|^2, \quad (6)$$

where d_j – expected output for the prototype v_j ; $\|\cdot\|$ – Euclidean norm of a vector; N – total number of examples presented to the network for training.

As can be seen from 6, the physical meaning of the minimizing empirical risk functional is reduced to a cost function. Function vector $F(\cdot)$ strictly depends on the choice of examples (d_j, v_i) , used to train the network. This means that different values of the pairs (d_j, v_i) will lead to the construction of various vector functions $F(\cdot)$.

The purpose of the decision stage is to form the final decision G based on the classifier obtained at the previous stage Y_{spec} .

Based on the main problem solved by the developed method for supporting decision-making on software security, the following options are possible:

- Software complies with security requirements;
- Software does not meet security requirements.

It should be noted that neglecting the opinion of an expert can lead to negative consequences in verification procedures. Therefore, in cases of a controversial decision, in order to increase the reliability of the results, it is necessary to provide for the possibility of expert intervention. Therefore, the final decision G can take one of three values:

- 1 – complies with safety requirements;
- 0 – does not comply with safety requirements;
- -1 – disputed decision.

To calculate the final solution G it is necessary to determine the position of the current solution in the space of possible solutions, relative to the reference positive and negative solutions.

$$\begin{aligned} G_{tr} &= \sqrt[2]{(1-y_1)^2 + (0-y_2)^2}; \\ G_{fl} &= \sqrt[2]{(0-y_1)^2 + (1-y_2)^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

where y_1, y_2 – the values of the elements of the previously calculated compliance classifier for the analyzed software.

The evaluation of the quality of the obtained solutions is proposed to be calculated based on the calculation of the standard deviation (SD) for the sets of positive and negative solutions.

3. Development of a neural network architecture for solving the problem of supporting decision making on software security

After performing one of the important steps – extraction of security features, which is usually performed without a teacher, the second important step is the choice of a reasonably small number of features that concentrate the most significant information about the input (classified) data. Despite the fact that an artificial neural network can independently carry out classification, it is recommended to supplement it with a training scheme with a teacher to improve performance.

It is also recommended that the artificial neural network be able to scale as new security features or sets of security requirements are added. All vector elements F_{sec} must be normalized with respect to the range of possible values of the chosen neuron model. On Fig. 2 a model of an artificial neural network is presented that corresponds to the general scheme of the method for supporting decision making on software security.

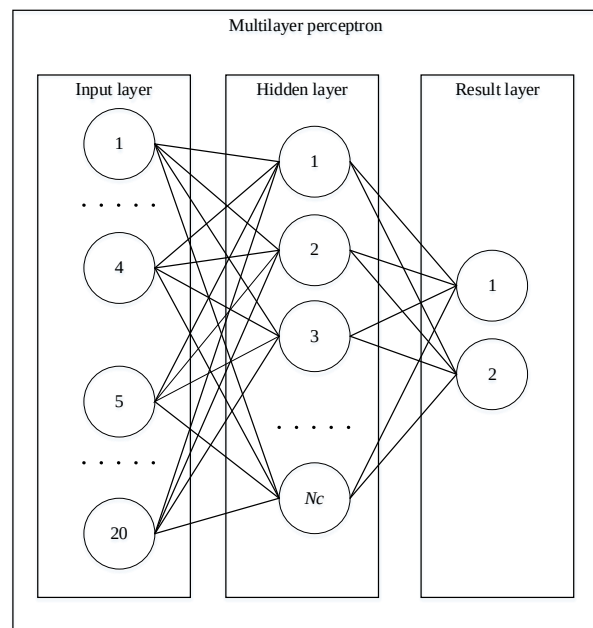


Fig. 2. Artificial neural network model

To solve the problem, one hidden layer of neurons is enough [8]. To build the final model of an artificial neural network, it is necessary to determine the number of neurons in the hidden layer, i.e. calculate its power.

To estimate the number of neurons in the hidden layers of homogeneous neural networks, you can use the formula for estimating the required number of synaptic weights L_w (in a multilayer network with sigmoidal transfer functions) [9]:

$$\frac{mN}{1 + \log_2 N} \leq L_w \leq m \left(\frac{N}{m} + 1 \right) (m + n + 1) + m, \quad (8)$$

where n – размерность входного вектора; m – dimension of the input vector; N – number of training sample elements.

Having estimated the required number of weights, we can calculate the number of neurons in the hidden layers. For a neural network with one hidden layer, the calculation is carried out according [10]^

$$L = \frac{L_w}{n + m}. \quad (9)$$

The dependence of the number of neurons in the hidden layers of the network on the number of weight connections is shown in Fig. 3.

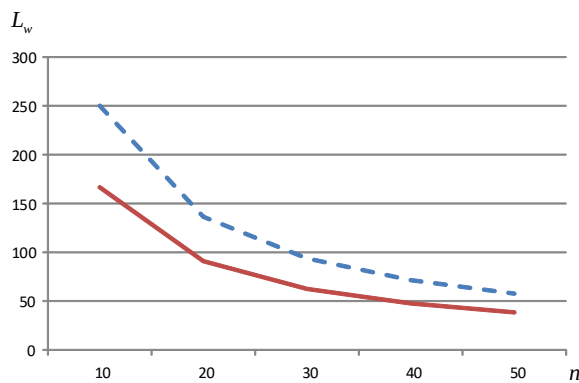


Fig. 3. Dependence of the number of neurons in the hidden layers of the network on the number of weight connections

It should be noted that the number of neurons in an artificial neural network should not be less than the number of classes, and since the exact number of classes may not be known in advance, the number of neurons is set with a certain margin. "Superfluous" neurons, whose weights will change chaotically during the learning process, can be removed at the end of this process.

4. Improvement of the artificial neural network training method

The conducted studies have shown that one of the most common and proven methods for training neural networks is the method of back propagation of an error. [11]. It is based on calculating the difference between the existing weight of the neural network and the necessary one to obtain the required result on a predetermined set of input signals, which is called training. The backpropagation method is aimed at minimizing the difference between the actual and expected network outputs by changing the weights of synapses.

The main requirement for applying the backpropagation method is the generation of such a set of pairs (v_p, y_p) input and output signals, training an artificial neural network on which will correctly solve the verification problem. At the same time, it is necessary that the artificial neural network has the properties of learning and generalization, and does not go in cycles around training examples.

In general, an artificial neural network training algorithm consists of the following steps:

1. The weights of the artificial neural network are assigned averaged initial values.
2. A training pair is selected (v_p, y_p) from the training set. Vector F_{sec} is fed to the input of the artificial neural network.
3. The result of the work of an artificial neural network is calculated.
4. The difference between the expected G and real network output.
5. Artificial neural network weights are adjusted to minimize the error.

The most important stage of training is the stage of forming a training data sample. The correctness of the formed training sample directly affects not only the efficiency of the neural network, but also its key features such as the ability to generalize and learnability.

To optimize the learning process, there are strategies such as determining support vectors and identifying principal components. However, existing approaches do not take into account the influence of the order of examples in the training sample on the final learning outcome [12].

It should also be noted the need to ensure a "dense" distribution of values in the training sample in the zone of the threshold value of the software safety characteristic to minimize the probability of making an incorrect decision in the conditions of a slight deviation of the analyzed characteristic from the safe value. Practical studies have shown that in order to achieve the required quality of training, it is sufficient that the size of the training set N satisfies the following relation:

$$N = O(W/\varepsilon), \quad (10)$$

where W – total number of free parameters (synaptic weights) of the network, ε – allowable classification error accuracy, $O(\)$ – order of value enclosed in brackets. In accordance with the ratio (8): $W_{min} = 37$; $W_{max} = 2758$.

Based on relation (10), it is possible to calculate the dependence of the number of elements in the training sample on the required accuracy of work. On Fig. 4 a graph of the dependence of the number of elements in the training sample on the required accuracy of work is presented, under conditions: $O() = 10$, $1\% \leq \varepsilon \leq 23\%$, $W_{min} = 37$, $W_{midl} = 1000$, $W_{max} = 2758$.

It should be noted that in order to reduce the number of training examples, it is necessary to choose the optimal values G and ε . As can be seen from the graphs in Fig. 4, for the above example, with $\varepsilon = 9\%$ results take the maximum value.

Based on the above, it follows that the developed teaching method should provide:

- the possibility of scaling;
- minimizing a sufficient number of training examples;
- maximum accuracy in solving the problem of software security classification.

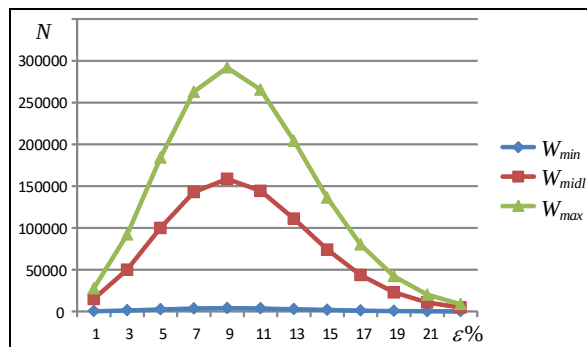


Fig. 4. Graphs of the dependence of the number of elements in the training sample on the required accuracy of work

The most important stage of the artificial neural network training method is the stage of generating a set of training examples. The key properties of the artificial neural network depend on the quality of this set. At the same time, it is necessary that the set of training examples correspond to the principles of emphasis and uniformity in the presentation of safety classes.

This generation method includes three levels of generation: generation of a training sample, generation of a training example, and generation of a specific value of a security characteristic. Lots of teaching examples M_x is a set of pairs V_i, Y_i .

$$M_x = \{(V_1, Y_1), \dots, (V_i, Y_i)\}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (11)$$

where V_i – source data vector, a Y_i – known beforehand result of the work of an artificial neural network for V_i .

At the level of generating a set of examples, the general requirements for the training sample are taken into account. First of all, determining its scope, ensuring that all levels of control are equally represented, and also controlling the equal presentation of positive and negative examples. The generation of the value of a particular training example is determined by the function $F()$, whose arguments are: the maximum value of the characteristic, the number of the generated characteristic, the level of control, and a variable indicating the positiveness of the example.

The output of the example generation is a vector, the first four elements of which indicate the level of security control, the last element is the required result, and the remaining elements are the values of the software characteristics. The $Fgen(Si, Cnt)$ function is responsible for generating the characteristic values. The function is formed on the basis of the binomial distribution law, which allows you to focus the attention of the artificial neural network on the region of the transition value of the characteristic:

$$F_{gen}(Vi) = P(Y_{spec} \leq Vi) = \sum_{k=0}^{\lfloor Vi \rfloor} C_n^k p^k q^{n-k}, \quad Vi \in \{0; 1\}. \quad (12)$$

In addition, the feasibility of generating the correct value of the characteristic is determined using the accounting matrix - M , which signals the level of security control. If the value of the matrix element is 1,

then the characteristic must be generated correctly, and the value 0 indicates that the value of this characteristic is not taken into account for this control level and this characteristic can be neglected in this example.

The matrix taking into account the characteristics is compiled in accordance with the requirements of regulatory documents. This example is based on the requirements of a non-profit organization MITRE Corporation. To test the effectiveness and feasibility of using the improved method for generating training examples, experimental studies were carried out using the principles of uniform distribution of training examples over the entire set of options, and also focusing on the improved method. The number of training examples in the sample was taken equal to 4000.

The result of the generation is a matrix of training examples M_x containing N training examples and N results. The matrix determines the values of the two resulting neurons for each training example. As a result, two sets containing 4000 training examples were obtained. The results of comparative studies of the improved generation method are presented in Table 2.

Table 2 – Comparative studies of an improved method for generating a set of training examples

	MxGen	Gen_teach
Number of elements	4000	4000
Positive		
Number of correct decisions	640	991
% correct decisions	64	99,1
Negative		
Number of correct decisions	3240	3987
% correct decisions	81,8	99,8

As can be seen from the values of the experimental results, the accuracy of classification and decision making increased by 1.6 times for positive elements in the sample and by 1.2 times for negative elements in the sample.

5. Investigation of the effectiveness of the decision support method for software security

To study the effectiveness of the proposed method for supporting decision making on software security, software was developed using the built-in libraries of the Python programming language [13]. This software made it possible to simulate the processes of functioning of an artificial neural network with training on relevant examples. A number of test values were generated. 1000 sets of security indicators with a predetermined result, as well as 500 - not corresponding. The values of this set were fed to the input of the trained artificial neural network, and the result obtained was compared with the known one. According to the results of the experiment, the results obtained were more than 96% consistent with the expected. The results of the experiment are presented in the form of graphs of ROC-curves of the distribution of the obtained results by solutions [14] in Fig. 5. To conduct a comparative analysis of the developed method, classifiers based on discriminant and cluster analysis are taken as reference solutions. Fig. 6 shows graphs of the ROC distribution curves of the results obtained using discriminant (Fig. 6, a) and cluster (Fig. 6, b) analysis.

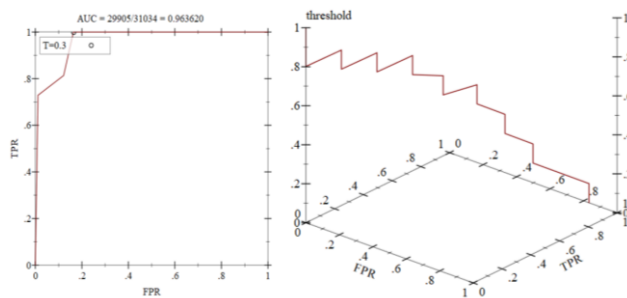


Fig. 5. Plots of ROC-curves for the distribution of the results obtained by solutions

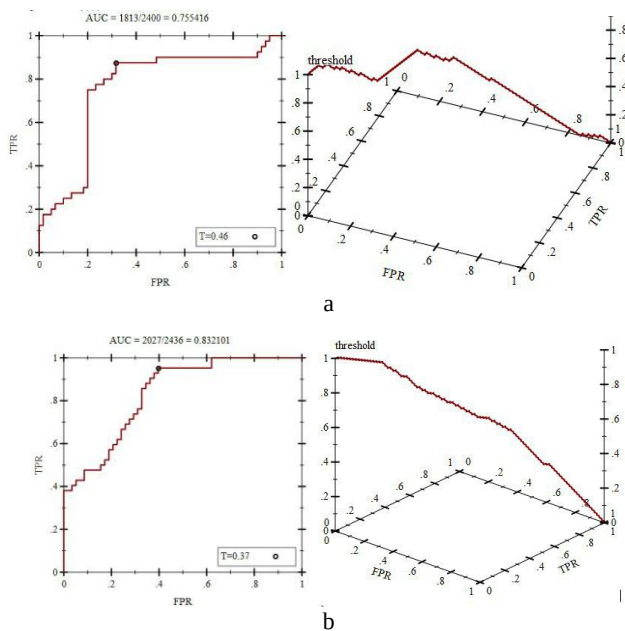


Fig. 6. Graphs of ROC-curves of distribution of the obtained results using discriminant (a) and cluster (b) analysis

The analysis of the classification ROC curve based on the fuzzy cluster classifier (Fig. 6, b) was performed only for two classes, since the procedure for constructing an ROC curve for a larger number is difficult. The results of the analysis of the quality of the

functioning of the fuzzy cluster classifier confirmed the hypothesis about the effectiveness of the developed method for supporting decision-making on software security up to 1.2 times.

Conclusions

1. A method has been developed to support decision-making on software security. A distinctive feature of the method is the synthesis of an improved method for generating a training sample in the process of training an artificial neural network. This made it possible to increase the efficiency of the software security decision support method up to 1.2 times.

2. In the course of the study, a model for the formation of input data vectors was developed. In accordance with this model, for the formation of input data, a set of signs of potential vulnerabilities and undeclared software capabilities is formed in accordance with the data PVS-Studio Analysis Results.

3. It was proposed to take a multilayer perceptron as a basis for the design of the neural network architecture for solving the problem of supporting decision-making about software security.

4. Artificial neural network training method that is different the way of generating the learning sample has been improved. This generation method included three levels of generation: generation of a training sample, generation of a training example, and generation of a specific value of a security characteristic. This made it possible to increase the accuracy of classification and decision making by 1.6 times for positive elements in the sample and by 1.2 times for negative elements in the sample.

5. Using ROC-analysis procedures, the effectiveness of the method for supporting decision-making on software security was carried out. The results of the experiment confirmed the hypothesis about the effectiveness of the developed method for supporting decision-making on software security up to 1.2 times compared to methods based on the provisions of discriminant and cluster analysis.

REFERENCES

1. Semenov, S., Zhang, L., Cao, W., Bulba, S. & Davydov, V. (2021), "Development of a fuzzy GERT-model for investigating common software vulnerabilities", *EEJET*, Vol. 6(2, 114), pp. 6–18, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.243715>
2. Semenov, S., Liqiang, Z., Weiling, C. & Davydov, V. (2021), "Development a mathematical model for the software security testing first stage", *EEJET*, Vol. 3(2, 111), pp. 24–34, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.233417>
3. (2021), *Introduction Welcome to the OWASP Top 10 – 2021*, available to: <https://owasp.org/Top10/>
4. (2015), [Dan Sullivan](https://www.techtarget.com/searchsecurity/feature/Six-criteria-for-procuring-security-analytics-software) Six criteria for procuring security analytics software, available to: <https://www.techtarget.com/searchsecurity/feature/Six-criteria-for-procuring-security-analytics-software>
5. (2022), *CWE List Version 4.1*, available to: <https://cwe.mitre.org/data/>
6. Schilling, A., Maier, A., Gerum, R., Metzner, C. & Krauss, P. (2021), "Quantifying the separability of data classes in neural networks", *Neural Networks*, Vol. 139, pp. 278–293, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.03.035>.
7. Gelvih, M. (2021), *CWE Top 25 2021*, available to: <https://pvs-studio.com/en/blog/posts/0869/>
8. Zhao, Z., Xu, Sh., B. Ho, Kang, Kabir, M., Liu, Yu. & Wasinger, R. (2015), "Investigation and improvement of multi-layer perceptron neural networks for credit scoring", *Expert Systems with Applications*, Vol. 42, Is. 7, pp. 3508–3516, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.12.006>
9. Zaki, P.W. (2019), "A Novel Sigmoid Function Approximation Suitable for Neural Networks on FPGA", 2019 15th Int. Computer Engineering Conference (ICENCO), pp. 95–99, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICENCO48310.2019.9027479>.
10. Kleyko, D., Rosato, A., Frady, E.P., Panella, M. & Friedrich, T. (2012), *Sommer Perceptron Theory for Predicting the Accuracy of Neural Networks*, available to: <https://arxiv.org/pdf/2012.07881.pdf>
11. Dzerzhinsky, R.I., Trifonov, M.D. & Ledovskaya, E.V. (2021), "The Support Vectors and Random Forest Methods Analysis in the Forecasting Customer Churn Problem in Banking Services", *Data Science and Intelligent Systems*, CoMeSySo, Lecture Notes in Networks and Systems, vol 231, Springer, Cham, available to: https://doi.org/10.1007/978-3-030-90321-3_26

12. (2021), Introduction to Python Programming (Beginner's Guide), available to: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/05/introduction-to-python-programming-beginners-guide/>
13. Gavrylenko, S., Chelak, V., Semenov, S. & Chelak E. (2019), "Development of anomalous computer behavior detection method based on probabilistic", *Security in cervatury, the social internet space in context values and hazards*, Slupsk-Kharkiv, pp. 237-258.

Надійшла (received) 23.11.2021

Прийнята до друку (accepted for publication) 26.01.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Ліцян Чжан – викладач коледжу комп'ютерних наук, Типовий університет Нейцзяна, Нейцзян, Китай;

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>.

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>.

Розробка методу підтримки прийняття рішення про безпеку програмного забезпечення

Чжан Ліцян, Н. М. Мірошніченко

Анотація. Визначено актуальність питання підвищення точності результатів прийняття рішення щодо процесу тестування безпеки програмного забезпечення. Проведено аналіз методів підтримки прийняття рішення. Визначено необхідність і можливість підвищення точності результатів прийняття рішення при дослідженні вразливостей програмного забезпечення в умовах нечіткості вхідних і проміжних даних. З цією метою на основі математичного апарату нечіткої логіки розроблено метод підтримки прийняття рішення про безпеку програмного забезпечення. Відмінною особливістю даного методу є синтез удосконаленого способу генерації навчальної вибірки у процес навчання штучної нейронної мережі. В рамках моделювання виконані наступні етапи дослідження. Для математичної формалізації процесу прийняття рішення та визначення вхідних даних розроблено модель формування векторів вхідних даних. Відповідно до даної моделі для формування вхідних даних формується безліч ознак потенційних вразливостей та недекларованих можливостей ПЗ відповідно до даних PVS-Studio Analysis Results. Для підвищення точності класифікації оброблюваних даних удосконалено метод навчання штучної нейронної мережі, що відрізняється способом генерації вибірки, що навчається. Даний спосіб генерації включив три рівні генерації: генерація навчальної вибірки, генерація навчального прикладу і генерація конкретного значення характеристики безпеки. Це дозволило підвищити точність класифікації та прийняття рішення у 1,6 рази для позитивних елементів у вибірці та у 1,2 рази для негативних елементів у вибірці. Для підтвердження ефективності розробки методу підтримки прийняття рішення щодо безпеки програмного забезпечення проведено ROC-аналіз з виконанням відповідних процедур. Результати експерименту підтвердили гіпотезу про ефективність розробленого методу підтримки прийняття рішення про безпеку ПЗ до 1,2 рази порівняно з методами, в основі яких використовуються положення дискримінантного та кластерного аналізу.

Ключові слова: вразливість програмного забезпечення; тестування безпеки; підтримка прийняття рішення; нечітка логіка; кіберзагроза.

Разработка метода поддержки принятия решения о безопасности программного обеспечения

Чжан Лицян, Н. Н. Мирошнichenko

Аннотация. Определена актуальность вопроса повышения точности результатов принятия решения процесса тестирования безопасности программного обеспечения. Проведен анализ методов поддержки принятия решения. Определены необходимость и возможность повышения точности результатов принятия решения при исследовании уязвимостей программного обеспечения в условиях нечеткости входных и промежуточных данных. С этой целью на основе математического аппарата нечеткой логики разработан метод поддержки принятия решения о безопасности программного обеспечения. Отличительной особенностью данного метода является синтез усовершенствованного способа генерации обучающей выборки в процесс обучения искусственной нейронной сети. В рамках моделирования выполнены следующие этапы исследования. Для математической формализации процесса принятия решения и определения входных данных разработана модель формирования векторов входных данных. В соответствии с данной моделью для формирования входных данных формируется множество признаков потенциальных уязвимостей и недекларируемых возможностей ПО в соответствии с данными PVS-Studio Analysis Results. Для повышения точности классификации обрабатываемых данных усовершенствован метод обучения искусственной нейронной сети, отличающийся способом генерации обучающейся выборки. Данный способ генерации включил три уровня генерации: генерация обучающей выборки, генерация учебного примера и генерация конкретного значения характеристики безопасности. Это позволило повысить точность классификации и принятия решения в 1,6 раз для положительных элементов в выборке и в 1,2 раза для отрицательных элементов в выборке. Для подтверждения эффективности разработки метода поддержки принятия решения безопасности программного обеспечения проведен ROC-анализ с выполнением соответствующих процедур. Результаты эксперимента подтвердили гипотезу об эффективности разработанного метода поддержки принятия решения о безопасности ПО в 1,2 раза по сравнению с методами, в основе которых используются положения дискриминантного и кластерного анализа.

Ключевые слова: уязвимость программного обеспечения; тестирование безопасности; поддержка принятия решения; нечеткая логика; киберугроза.

Applied problems of information systems operation

УДК 519.668:319.66

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.1.17>С. В. Гадецька¹, В. Ю. Дубницький², Ю. І. Кушнерук³, О. І. Ходирєв²¹ Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна² ННІ "Каразінський банківський інститут" ХНУ імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна³ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

ВИКОНАННЯ ОСНОВНИХ АРИФМЕТИЧНИХ ДІЙ З КОМПЛЕКСНИМИ ЧИСЛАМИ, ЯКІ ПРЕДСТАВЛЕНО В ІНТЕРВАЛЬНІЙ ГІПЕРБОЛІЧНІЙ ФОРМІ

Анотація. Мета роботи. Розробка способів виконання основних арифметичних дій з інтервальними комплексними числами, які представлені в гіперболічній формі, їх модуля і аргументу. **Результати.** В роботі розглянуто метод розширення інтервальних чисел, визначених в гіперболічній формі (гіперболічних інтервальних чисел) на поле комплексних чисел. Для цього дійсно та уявну частини комплексного числа подають у формі гіперболічного інтервального числа. Встановлено зв'язки між поданням інтервальних чисел у класичній формі, системі ЦЕНТР-РАДІУС та гіперболічній формі. Запропоновано методи виконання основних арифметичних дій з гіперболічними комплексними числами, а саме: додавання, віднімання, множення та ділення. Запропоновано метод піднесення в цілочисельний додатний степінь комплексного інтервального числа, визначеного в гіперболічній формі. Запропоновано методи обчислення модулю та аргументу комплексного числа, визначеного в гіперболічній формі. Запропоновано метод визначення кореня ступеня n з інтервального комплексного числа, представленого в гіперболічній формі. Використовуючи зв'язки між гіперболічними та тригонометричними функціями запропоновано форму подання інтервального числа в тригонометричній формі. Встановлено, що найбільш доцільно виконувати дії додавання та віднімання з комплексними інтервальними числами, які мають класичну форму, або визначені в системі ЦЕНТР-РАДІУС. Операції множення, ділення та піднесення в цілочисельний степінь найбільш доцільно виконувати з комплексними інтервальними числами, які визначено в гіперболічній формі. Операцію обчислення кореня ступеня n з інтервального комплексного числа, представленого в гіперболічній формі, найбільш доцільно виконувати з сумісним використанням подання інтервального числа в системі ЦЕНТР-РАДІУС та в гіперболічній формі.

Ключові слова: інтервальні числа; гіперболічна форма інтервального числа; комплексні інтервальні числа; арифметичні дії з гіперболічними комплексними інтервальними числами.

Вступ

У 1893 р. один з батьків сучасної електротехніки Чарльз Протеус Штейнмец (1865-1923) запропонував використання комплексних чисел при аналізі процесів в мережах змінного струму [1]. З тих пір виклад цього методу увійшов до всіх підручників електротехніки [26] і математики для електро- і радіоінженерів [2]. Розвиток інтервального аналізу привів до поєднання цих методів [3, 4]. У роботі [5] було запропоновано представлення дійсного інтервального числа в так званій гіперболічній формі.

Аналіз літератури. Відповідно до [6-8] в даній роботі дійсне інтервальне число $[A]$ буде визначено у вигляді пари дійсних чисел:

$$[A] = (a_1, a_2) \quad 0 < a_1 \leq a_2. \quad (1)$$

Будемо вважати, що умова (1) визначає інтервальне число в класичній формі. Основні арифметичні дії з інтервальними числами в цьому випадку виконують за правилами:

$$[A] + [B] = (a_1, a_2) + (b_1, b_2) = [(a_1 + b_1), (a_2 + b_2)]; \quad (2)$$

$$[A] - [B] = (a_1, a_2) - (b_1, b_2) = [(a_1 - b_2), (a_2 - b_1)]; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} [A] \cdot [B] &= (\min(U), \max(U)), \\ U &= (a_1 b_1, a_1 b_2, a_2 b_1, a_2 b_2); \end{aligned} \quad (4)$$

$$[A]/[B] = (a_1, a_2) \cdot (1/b_2, 1/b_1), \quad 0 \notin [b_1, b_2]. \quad (5)$$

В роботі [9] запропоновано представлення інтервального числа $\langle A \rangle$ у системі ЦЕНТР-РАДІУС як упорядкованої пари дійсних чисел:

$$\langle A \rangle = \langle a, r_a \rangle \quad (6)$$

$$\text{де} \quad a = (a_1 + a_2)/2, \quad r_a = (a_2 - a_1)/2. \quad (7)$$

У подальшому будемо приймати, що $|r_a| < |a|$. Інші випадки в роботі не розглянуто, тому що вони не відповідали фізичному змісту задач, які розв'язували автори даного повідомлення. Основні арифметичні дії з інтервальними числами в системі ЦЕНТР-РАДІУС виконують за правилами, наведеними в [9]:

$$A + B = \langle a + b, r_a + r_b \rangle; \quad (8)$$

$$A - B = \langle a - b, r_a + r_b \rangle. \quad (9)$$

У роботі [5] прийнята умова, що межі інтервалів, які визначають дані числа, утворені обчислювальними помилками, похибками вимірювань або неповним знанням області зміни деякої фізичної величини. Тому повинні виконуватися нерівності:

$$a \geq r_a \geq 0, \quad b \geq r_b \geq 0. \quad (10)$$

У протилежному випадку будемо вважати, що зада-

ча, в межах наших уявлень про об'єкт дослідження, фізичного змісту не має.

В роботі [9] запропоновано формули для виконання в системі ЦЕНТР-РАДІУС операцій ділення та множення в такому вигляді:

$$\langle a, r_a \rangle \langle b, r_b \rangle = \langle ab + r_a r_b, ar_b + br_a \rangle; \quad (11)$$

$$\frac{\langle a, r_a \rangle}{\langle b, r_b \rangle} = \left\langle \frac{ab + r_a r_b}{b^2 - r_b^2}, \frac{ar_b + br_a}{b^2 - r_b^2} \right\rangle. \quad (12)$$

В роботі [9] запропоновано піднесення в цілий додатний степінь інтервального числа $[A] = (a_1, a_2)$, яке визначено в класичній формі, виконувати за правилом:

$$[A]^n = \begin{cases} [a_1^n, a_2^n], & \text{якщо } a_1 > 0; \\ [0, \max\{a_1^n, a_2^n\}], & \text{якщо } 0 \in [a_1, a_2], \\ & n = 2k, k = 1, 2, \dots; \\ [a_1^n, a_2^n], & \text{якщо } 0 \in [a_1, a_2], \\ & n = 2k + 1, k = 0, 1, 2, \dots; \\ [a_2^n, a_1^n], & \text{якщо } a_2 < 0, n = 2k, k = 1, 2, \dots; \\ [a_1^n, a_2^n], & \text{якщо } a_2 < 0, n = 2k + 1. \end{cases} \quad (13)$$

Для тієї ж операції, яку виконують в системі ЦЕНТР-РАДІУС, в [9] наведено співвідношення:

$$A^n = \langle a, r_a \rangle^n = \langle G, R \rangle \quad (14)$$

за умови, що $n \in \mathbb{Z}$. Тоді:

$$G = \sum_{k=0}^n C_n^{2k} r_a^{2k} a^{n-2k}; \quad (15)$$

$$R = \sum_{k=0}^n C_n^{2k+1} r_a^{2k+1} |a|^{n-(2k+1)}.$$

Для $n = 2$ отримаємо:

$$\langle A \rangle^2 = \langle a^2 + r_a^2, 2 \cdot |a| \cdot r_a \rangle. \quad (16)$$

В роботах [5, 10] запропоновано гіперболічну форму подання інтервального числа. У цьому варіанті інтервальне число x записують у вигляді:

$$x = \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi). \quad (17)$$

У співвідношенні (17) прийнято, що θ – спеціальний символ. За замовченням вважають, що $\theta^2 = 1$. Величину ρ в роботах [5, 10] названо гіпермодулем, величину ϕ – аргументом гіперболічного інтервального числа (гіперболічного числа, згідно з термінологією, яка прийнята в роботі [5]). Величини ρ і ϕ визначають за співвідношеннями:

$$\rho = \sqrt{a_1 a_2}, \quad \phi = \frac{1}{2} \ln \frac{a + r_a}{a - r_a} = \frac{1}{2} \ln \frac{a_2}{a_1}. \quad (18)$$

Із співвідношення (18) виходить, що гіпермодуль – це середня геометрична меж інтервалу. Відповідно до роботи [5] в табл. 1 наведено зв'язки між різними формами подання інтервальних чисел, які буде розглянуто в даній роботі.

Таблиця 1 – Зв'язки між різними формами подання інтервальних чисел

Форми подання інтервальних чисел	Форми подання інтервальних чисел		
	Класична, $[A] = (a_1, a_2)$	Система ЦЕНТР-РАДІУС, $\langle A \rangle = \langle a, r_a \rangle$	Гіперболічна, $x = f(\rho, \phi)$
Класична, $[A] = (a_1, a_2)$	$[A] = (a_1, a_2)$	$[A] = (a - r_a, a + r_a)$	$[A] = (\rho[ch\phi - sh\phi], \rho[ch\phi + sh\phi])$
Система ЦЕНТР-РАДІУС, $\langle A \rangle = \langle a, r_a \rangle$	$\langle A \rangle = \left\langle \frac{a_1 + a_2}{2}, \frac{a_2 - a_1}{2} \right\rangle$	$\langle A \rangle = \langle a, r_a \rangle$	$\langle A \rangle = \langle \rho \cdot ch\phi, \rho \cdot sh\phi \rangle$
Гіперболічна, $x = f(\rho, \phi)$	$[A] = (\sqrt{a_1 a_2} ch(\phi), \sqrt{a_1 a_2} sh(\phi))$ $\phi = 0.5 \cdot \ln a_2 / a_1$	$\langle A \rangle = \sqrt{a^2 - r_a^2} \cdot (ch\phi + \theta \cdot sh\phi)$ $\phi = 0.5 \cdot \ln(a + r_a) / (a - r_a)$	$x = \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi)$

Основні арифметичні дії для пари гіперболічних чисел $x = \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi)$ та $y = \delta(ch\psi + \theta \cdot sh\psi)$ відповідно до [5, 10], виконують за правилами:

$$x + y = (\rho \cdot ch\phi + \delta \cdot ch\psi) + \theta(\rho \cdot sh\phi + \delta \cdot sh\psi). \quad (19)$$

$$x - y = (\rho \cdot ch\phi - \delta \cdot ch\psi) + \theta(\rho \cdot sh\phi - \delta \cdot sh\psi). \quad (20)$$

$$x \cdot y = \rho \delta (ch(\phi + \psi) + \theta \cdot sh(\phi + \psi)) \quad (21)$$

$$x^{-1} = (\rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi))^{-1} = \frac{1}{\rho} (ch(-\phi) + \theta \cdot sh(-\phi)). \quad (22)$$

$$\frac{x}{y} = \frac{\rho}{\delta} (ch(\phi - \psi) + \theta \cdot sh(\phi - \psi)). \quad (23)$$

$$x^n = (\rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi))^n = \rho^n (ch(n\phi) + \theta \cdot sh(n\phi)). \quad (24)$$

Також в роботі [5] розглянуто випадки, в яких одна з величин стала. Тоді отримаємо:

$$c \pm x = (c \pm \rho \cdot ch\phi) \pm \theta \cdot sh(\phi). \quad (25)$$

Для множення сталої величини c на гіперболічне число x отримаємо:

$$cx = c\rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi). \quad (26)$$

Для операції ділення у вказаній роботі наведено два варіанти операції. У першому варіанті:

$$x/c = (\rho/c) \cdot (ch\phi + \theta \cdot sh\phi). \quad (27)$$

У другому варіанті:

$$c/x = (c/\rho) \cdot (ch\phi - \theta \cdot sh\phi). \quad (28)$$

Враховуючи потреби електротехніки й інших інженерних дисциплін в роботах [6, 10, 13] описано розширення основних понять і методів інтервальної арифметики на комплексну площину. Відповідно до цих робіт комплексне інтервальне число $[Z]$ визначимо таким чином:

$$\left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right] = [X] + [Y] \cdot i = (x_1, x_2) + (y_1, y_2) \cdot i, \quad i = \sqrt{-1}. \quad (29)$$

Тобто, геометричним образом комплексного інтервального числа буде прямокутник, визначений на комплексній площині, геометричним образом дійсного інтервального числа буде відрізок числової осі. Відповідно до [14] для зручності подальших обчислень представимо комплексне інтервальне

число у вигляді впорядкованої пари $\left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right] = \langle [X], [Y] \rangle$

і виконаємо основні арифметичні дії за правилами:

$$\left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]_1 + \left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]_2 = \langle [X]_1 + [X]_2; [Y]_1 + [Y]_2 \rangle; \quad (30)$$

$$\left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]_1 - \left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]_2 = \langle [X]_1 - [X]_2; [Y]_1 - [Y]_2 \rangle; \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]_1 \left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]_2 &= \\ &= \langle [X]_1 [X]_2 - [Y]_1 [Y]_2; [X]_1 [Y]_2 + [X]_2 [Y]_1 \rangle; \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]_1 / \left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]_2 &= \\ &= \left\langle \frac{[X]_1 [X]_2 + [Y]_1 [Y]_2}{[X]_1^2 + [X]_2^2}; \frac{[X]_2 [Y]_1 - [X]_1 [Y]_2}{[X]_1^2 + [X]_2^2} \right\rangle. \end{aligned} \quad (33)$$

Для визначення модуля дійсного інтервального числа вигляду (1) в [6, 7, 12] є співвідношення:

$$[A] = \max\{|a_1|, |a_2|\}. \quad (34)$$

Для модуля комплексного інтервального числа вигляду (29) в роботах [11, 13] є співвідношення:

$$\begin{aligned} \left| \left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right] \right| &= \sqrt{[X]^2 + [Y]^2} = \\ &= \sqrt{|\max(x_1, x_2)|^2 + |\max(y_1, y_2)|^2}. \end{aligned} \quad (35)$$

З приведенного аналізу виходить, що в літературі описано зведення про виконання основних арифметичних дій з інтервальними комплексними числами, представленими тільки в класичній формі.

Постановка задачі. Розробка способів виконання основних арифметичних дій з інтервальними комплексними числами, які представлено в гіперболічній формі, їх модуля і аргументу.

$$\text{де} \quad R_4 = \frac{[\rho\gamma(ch(\phi+\omega)+\theta\cdot sh(\phi+\omega))] + [\delta\lambda(ch(\psi+\eta)+\theta\cdot sh(\psi+\eta))]}{[\gamma^2(ch(2\omega)+\theta\cdot sh(2\omega))] + [\lambda^2(ch(2\eta)+\theta\cdot sh(2\eta))]}; \quad (48)$$

Отримані результати

Виконання основних арифметичних дій з інтервальними комплексними числами, які представлено в гіперболічній формі. Розглянемо пару комплексних інтервальних чисел, в яких дійсну і уявну частини представлено в гіперболічній формі, відповідно до співвідношення (17):

$$\begin{aligned} \left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]_1 &= x_1 + iy_1 = \\ &= \{\rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi)\} + i\{\delta(ch\psi + \theta \cdot sh\psi)\}; \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]_2 &= x_2 + iy_2 = \\ &= \{\gamma(ch\omega + \theta \cdot sh\omega)\} + i\{\lambda(ch\eta + \theta \cdot sh\eta)\}. \end{aligned} \quad (37)$$

Використовуючи (19)...(23) і (29)...(32), отримаємо наступні співвідношення для основних арифметичних дій з комплексними інтервальними числами, представленими в гіперболічній формі. Суму двох інтервальних комплексних чисел у цьому випадку можна представити у вигляді:

$$T_1 = \left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]_1 + \left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]_2 = R_1 + iE_1, \quad (38)$$

$$\text{де} \quad R_1 = (\rho ch\phi + \gamma ch\omega) + \theta(\rho sh\phi + \lambda sh\omega); \quad (39)$$

$$E_1 = (\delta ch\psi + \lambda ch\eta) + \theta(\rho sh\psi + \lambda sh\eta). \quad (40)$$

Різницю двох інтервальних комплексних чисел у цьому випадку можна представити у вигляді:

$$T_2 = \left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]_1 - \left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]_2 = R_2 + iE_2, \quad (41)$$

$$\text{де} \quad R_2 = (\rho ch\phi - \lambda ch\omega) + \theta(\rho sh\phi - \lambda sh\omega); \quad (42)$$

$$E_2 = (\delta ch\psi - \lambda ch\eta) + \theta(\rho sh\psi - \lambda sh\eta). \quad (43)$$

Добуток двох інтервальних комплексних чисел у цьому випадку можна представити у вигляді:

$$T_3 = \left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]_1 \times \left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]_2 = R_3 + iE_3, \quad (44)$$

$$\text{де} \quad R_3 = \rho\gamma[ch(\phi+\omega)+\theta sh(\phi+\omega)] - \lambda\delta[ch(\psi+\eta)+\theta sh(\psi+\eta)]; \quad (45)$$

$$E_3 = \rho\lambda[ch(\phi+\eta)+\theta sh(\phi+\eta)] + \gamma\delta[ch(\omega+\psi)+\theta sh(\omega+\psi)]. \quad (46)$$

Результат ділення двох інтервальних комплексних чисел у цьому випадку можна представити як

$$T_4 = \left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]_1 / \left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]_2 = R_4 + iE_4, \quad (47)$$

$$E_4 = \frac{[\gamma\delta(ch(\omega+\psi)+\theta\cdot sh(\omega+\psi))]-[\rho\lambda(ch(\phi+\eta)+\theta\cdot sh(\phi+\eta))]}{[\gamma^2(ch(2\omega)+\theta\cdot sh(2\omega))]+[\lambda^2(ch(2\eta)+\theta\cdot sh(2\eta))]} \quad (49)$$

Піднесення в цілий додатний степінь комплексного інтервального числа, представленого в гіперболічній формі. Для піднесення комплексного інтервального числа $\left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]$, яке представлено в гіперболічній формі:

$$\left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right] = \{\rho(ch\phi+\theta\cdot sh\phi)\} + i\{\delta(ch\psi+\theta\cdot sh\psi)\} \quad (50)$$

у цілий додатний степінь n , виділимо його дійсну a і уявну b частини, які дорівнюють відповідно:

$$a = \rho(ch\phi+\theta\cdot sh\phi), \quad b = \delta(ch\psi+\theta\cdot sh\psi) \quad (51)$$

Тоді отримаємо, що:

$$\left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]^n = (a+bi)^n = \sum_{k=0}^n C_n^k a^{n-k} (ib)^k \quad (52)$$

Використовуючи (21) для співвідношення (52) отримаємо:

$$a^{n-k} = \rho^{n-k} [ch((n-k)\phi) + \theta\cdot sh((n-k)\phi)] \quad (53)$$

$$(ib)^k = i^k [\delta^k (ch(k\psi) + \theta\cdot sh(k\psi))]. \quad (54)$$

Використовуючи поняття порівняння по модулю, яке використовують в теорії чисел і яке викладено в [15], величину i^k визначимо таким чином:

$$i^k = \begin{cases} 1, & \text{якщо } k \equiv 4 \bmod(0); \\ i, & \text{якщо } k \equiv 4 \bmod(1); \\ -1, & \text{якщо } k \equiv 4 \bmod(2); \\ -i, & \text{якщо } k \equiv 4 \bmod(3). \end{cases} \quad (55)$$

Таким чином, отримаємо, що:

$$\left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]^n = \sum_{k=0}^n C_n^k \cdot i^k \rho^{n-k} \cdot [ch(k\psi) + \theta\cdot sh(k\psi)] \times [\delta^k \cdot [ch((n-k)\phi) + \theta\cdot sh((n-k)\phi)]] \quad (56)$$

Визначення аргументу комплексного інтервального числа, яке представлено в гіперболічній формі. Слід зауважити, що в роботі [16] детально розглянуто задачі і методи інтервальної геометрії, але визначення кута відсутнє. Тому, по аналогії з класичною теорією комплексних чисел, визначатимемо аргумент гіперболічного комплексного числа $\left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right]$,

як відношення уявної частини числа до його дійсної частини.

Для цього виконаємо такі перетворення:

$$d = \frac{\delta(ch\psi + \theta\cdot sh\psi)}{\rho(ch\phi + \theta\cdot sh\phi)} = \frac{\delta}{\rho} [ch(\psi - \phi) + \theta\cdot sh(\psi - \phi)]. \quad (57)$$

Прийmemo, що:

$$\delta / \rho = \chi \quad \psi - \phi = \tau. \quad (58)$$

Враховуючи співвідношення (17) і (57), співвідношення (58) прийме вигляд:

$$d = \chi(ch\tau + \theta\cdot sh\tau). \quad (59)$$

Отже:

$$\arg \left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right] = \begin{cases} \arctg(d), & \text{якщо } R > 0, \\ \pi + \arctg(d), & \text{якщо } R < 0, E \geq 0, \\ -\pi + \arctg(d), & \text{якщо } R < 0, E < 0, \\ \frac{\pi}{2}, & \text{якщо } R = 0, E > 0, \\ -\frac{\pi}{2}, & \text{якщо } R = 0, E < 0. \end{cases} \quad (60)$$

В умову (60) входять інтервальні числа і відношення між ними: $<$, $>$, $\geq$. Застосування цих відносин для порівняння інтервальних величин розглянуто в роботах [17, 22, 23].

Обчислення функції $[U] = \arctg[X]$ для інтервального числа, заданого в гіперболічній формі. Обчислення цієї функції для аргументу, який задано у вигляді інтервального числа, визначеного в системі ЦЕНТР-РАДІУС, розглянуто в роботі [17]. У даному повідомленні розглянута можливість використання методів, викладених в роботах [18]...[21] і призначених для обчислення значень функції $y = \arctg(x)$ дійсного аргументу x (табл. 2), та оцінено можливість їх використання для аргументу, заданого у вигляді інтервального гіперболічного числа.

Таблиця 2 – Методи обчислення функції $y = \arctg(x)$ дійсного аргументу x

№	L*	Метод обчислення
1	[20]	$\arctg(x) = \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(2k)!}{2^{2k}(k!)^2(2k+1)} \cdot \left(\frac{x^2}{1+x^2} \right)^k, \quad x^2 < \infty$
2	[19], [21]	$\arctg(x) = \frac{x}{1+x^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2^{2k}(k)!}{(2k+1)!} \cdot \left(\frac{x^2}{1+x^2} \right)^k, \quad x^2 < \infty$
3	[19], [20]	$\arctg(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k x^{2k+1}}{2k+1}, \quad x^2 \leq 1,$
4	[18]	$\arctg(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k x^{2k+1}}{2k+1}, \quad x^2 < 1$
5	[18]	$\arctg(x) = \frac{\pi}{2} - \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{1}{(2k+1)x^{2k+1}}, \quad x^2 \geq 1$
6	[18]	$\arctg(x) = \sum_{k=0}^m a_{2k+1} x^{2k+1}, \quad x^2 \leq 1$
7	[18]	$\arctg(x) = \frac{\pi}{4} + \sum_{k=0}^m a_{2k+1} \left(\frac{x-1}{x+1} \right)^{2k+1}, \quad 0 < x < \infty$

L* – відповідні літературні джерела

З порівняння наведених у табл. 2 співвідношень випливає, що вони розрізняються обмеженнями на величину аргументу $|x|$, наприклад, для №3 і №4, №5 і №6. Крім того, для набуття чисельного значення будь-якої функції слід враховувати особливості реалізації процесу обчислень для можливих форм подання інтервальних чисел. У нашому випадку найбільш зручним може бути співвідношення №6. Для оцінки величини m у цьому співвідношенні був проведений його чисельний аналіз. Розрахункові співвідношення, використані в цьому випадку, показано в табл. 3.

Результати обчислення значень функції $y = \arctg(x)$ за умови $x = -1, (0, 2), 1$ показано в табл. 4.

Отримані значення порівнювали з табличними значеннями, наведеними в [24]. З отриманих даних виходить, що при кількості доданків $m = 5$ результат обчислень значень функції $y = \arctg(x)$ забезпечує хороше співпадіння з табличними значеннями.

Таблиця 3 – Многочлени, використані для обчислення функції $y = \arctg(x)$

m	Многочлени
3	$\arctg(x) = 0,99935x - 0,288868x^3 + 0,07933x^5$
4	$\arctg(x) = 0,99921x - 0,321182x^3 + 0,14627x^5 - 0,03899x^7$
5	$\arctg(x) = 0,99986x - 0,33029x^3 + 0,18014x^5 - 0,08513x^7 + 0,020835x^9$

Таблиця 4 – Результати обчислення значень функції $y = \arctg(x)$

Значення аргументу, x	Значення функції $y = \arctg(x)$, якщо кількість доданків многочлену дорівнює m			Табличне значення функції $y = \arctg(x)$
	3	4	5	
-1	-0,7860	-0,78532	-0,7854	-0,7854
-0,8	-0,6744	-0,67468	-0,6747	-0,6747
-0,6	-0,5410	-0,54043	-0,5404	-0,5404
-0,4	-0,3804	-0,38056	-0,3805	-0,3805
-0,2	-0,1968	-0,19732	-0,1974	-0,1974
0	0	0	0	0
0,2	0,1968	0,19732	0,1974	0,1974
0,4	0,3804	0,38056	0,3805	0,3805
0,6	0,5410	0,54043	0,5404	0,5404
0,8	0,6744	0,67468	0,6747	0,6747
1	0,7860	0,78532	0,7854	0,7854

Використовуючи співвідношення (24), (55), (59) і співвідношення (№6, табл. 2) отримаємо, що:

$$\arctg(d) = \sum_{k=0}^5 a_{2k+1} \left\{ (\delta/\rho)^{2k+1} \left[\frac{ch((2k+1) \cdot (\psi - \phi)) + \theta \cdot sh((2k+1)(\psi - \phi))}{\rho^2 ch(2\phi) + \delta^2 ch(2\psi)} \right] \right\}. \quad (61)$$

Чисельні значення коефіцієнтів a_{2k+1} вказано в табл. 3, $m = 5$. Цю величину слід підставити в (59) для отримання аргументу комплексного інтервального числа, визначеного в гіперболічній формі.

Визначення модуля інтервального комплексного числа, представленого в гіперболічній формі. Відповідно до робіт [8, 13] і співвідношень (23) і (34) модуль комплексного інтервального числа

$$\left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right] = [R] + i[E] = \left\{ \begin{array}{l} \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi) + \\ + i\{\delta(ch\psi + \theta \cdot sh\psi)\} \end{array} \right\} \quad (62)$$

визначимо як співвідношення вигляду:

$$\left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right] = \sqrt{[R]^2 + [E]^2} = \sqrt{\left\{ \rho(ch\phi + \theta \cdot sh\phi) \right\}^2 + \left\{ \delta(ch\psi + \theta \cdot sh\psi) \right\}^2}. \quad (63)$$

Розкриваючи підкореневий вираз в (63) та беручи до уваги (24), отримаємо:

$$\left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right] = \sqrt{\left\{ \rho^2(ch(2\phi) + \theta \cdot sh(2\phi)) \right\} + \left\{ \delta^2(ch(2\psi) + \theta \cdot sh(2\psi)) \right\}}. \quad (64)$$

Спростуючи (63) і зважаючи на (19), отримаємо:

$$\left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right] = \sqrt{\left\{ \rho^2 ch(2\phi) + \delta^2 ch(2\psi) \right\} + \left\{ \rho^2 sh(2\phi) + \delta^2 sh(2\psi) \right\}}. \quad (65)$$

Для зручності подальших обчислень перейдемо від гіперболічної форми інтервального числа до інтервального числа, визначеного в системі ЦЕНТР-РАДІУС. Для цього використаємо результати роботи [5] і табл. 1 даного повідомлення:

$$\left\langle \begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right\rangle = \sqrt{\left\langle \left(\rho^2 ch(2\phi) + \delta^2 ch(2\psi) \right) \right\rangle} = \sqrt{\left\langle \begin{smallmatrix} \bullet \\ z, r_z \end{smallmatrix} \right\rangle} = \left\langle \exp \left(\frac{1}{2} \ln \left\langle \begin{smallmatrix} \bullet \\ z, r_z \end{smallmatrix} \right\rangle \right) \right\rangle. \quad (66)$$

Оскільки результат розрахунку, який наведено в (65), отримано в системі ЦЕНТР-РАДІУС, то для переходу до гіперболічної форми інтервального числа використаємо співвідношення табл. 1, отже:

$$\left[\begin{smallmatrix} \bullet \\ Z \end{smallmatrix} \right] = \sqrt{\left(\begin{smallmatrix} \bullet \\ z \end{smallmatrix} \right)^2 - r_z^2} \times \left(ch \left(\frac{1}{2} \ln \frac{\begin{smallmatrix} \bullet \\ z + r_z \end{smallmatrix}}{\begin{smallmatrix} \bullet \\ z - r_z \end{smallmatrix}} \right) + \theta \cdot sh \left(\frac{1}{2} \ln \frac{\begin{smallmatrix} \bullet \\ z + r_z \end{smallmatrix}}{\begin{smallmatrix} \bullet \\ z - r_z \end{smallmatrix}} \right) \right). \quad (67)$$

Обчислення кореня ступеня n з інтервального комплексного числа, представленого в гіперболічній формі. Обчислення кореня ступеня n з комплексного числа $\hat{z} = \hat{a} + i\hat{b}$, визначеного в традиційному вигляді, виконують, використовуючи таке співвідношення ($s = 0, 1, \dots, n-1$):

$$\frac{1}{\hat{z}^n} = (\hat{a}^2 + \hat{b}^2)^{\frac{1}{2n}} \left[\cos\left(\frac{\arctg(\hat{b}/\hat{a}) + 2s\pi}{n}\right) + i \sin\left(\frac{\arctg(\hat{b}/\hat{a}) + 2s\pi}{n}\right) \right]. \quad (68)$$

Докладніше умови застосування співвідношення (66) розглянуто в [14] або в будь-якому іншому посібнику аналогічного змісту. Прийемо, що:

$$H^{1/(2n)} = (\hat{a}^2 + \hat{b}^2)^{1/(2n)}; \quad (69)$$

$$T = \cos \frac{\arctg(\hat{b}/\hat{a}) + 2s\pi}{n} + i \sin \frac{\arctg(\hat{b}/\hat{a}) + 2s\pi}{n}. \quad (70)$$

Тоді співвідношення (71) отримає вигляд:

$$z^{1/n} = H^{1/(2n)} T. \quad (71)$$

Зважаючи на співвідношення (65), (66) отримаємо:

$$[H]^{\frac{1}{2n}} = \left\{ \begin{aligned} & \left[\rho^2 \operatorname{ch}(2\phi) + \delta^2 \operatorname{ch}(2\psi) \right] + \frac{1}{2n} \\ & + \theta \left[\rho^2 \operatorname{sh}(2\phi) + \delta^2 \operatorname{sh}(2\psi) \right] \end{aligned} \right\}^{\frac{1}{2n}} = \langle h, r_h \rangle^{\frac{1}{2n}}. \quad (72)$$

У співвідношенні (72) результат складання інтервальних чисел, представлених в гіперболічній формі, записано у формі інтервального числа, представленого в системі ЦЕНТ-РАДІУС. Правила такого переходу обґрунтовано в роботі [5] і представлене в табл. 1. Отже:

$$[H]^{1/(2n)} = \langle h, r_h \rangle^{1/(2n)} = \left\langle \exp\left(\frac{1}{2n}\right) \ln \langle h, r_h \rangle \right\rangle. \quad (73)$$

Розкриваючи співвідношення (73) і повертаючись до гіперболічної форми подання, отримаємо:

$$[H]^{1/(2n)} = \sqrt{h^2 - r_h^2} \times \left[\operatorname{ch}\left(\frac{1}{2} \ln \frac{h+r_z}{h-r_h}\right) + \theta \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{1}{2} \ln \frac{h+r_z}{h-r_h}\right) \right]. \quad (74)$$

Для визначення величини $\arctg(d)$ розкриємо дужки в (61) та отримаємо:

$$\begin{aligned} \arctg(d) = & \sum_{k=0}^5 a_{2k+1} \left\{ \left(\frac{\delta}{\rho} \right)^{2k+1} [\operatorname{ch}((2k+1) \cdot (\psi - \phi))] \right\} + \\ & + \theta \sum_{k=0}^5 a_{2k+1} \left\{ \left(\frac{\delta}{\rho} \right)^{2k+1} [\operatorname{sh}((2k+1) \cdot (\psi - \phi))] \right\}. \end{aligned} \quad (75)$$

Отже:

$$[T] = \left[\cos \frac{\arctg(d) + 2s\pi}{n} + i \sin \frac{\arctg(d) + 2s\pi}{n} \right]. \quad (76)$$

Таким чином, для обчислення кореня ступеня n з

інтервального комплексного числа, представленого в гіперболічній формі, необхідно виконати дії, передбачені співвідношеннями (71)...(75) і подати результат у вигляді співвідношення (76)

$$\left[\frac{\bullet}{z} \right]^{1/n} = [H]^{1/(2n)} [T]. \quad (77)$$

Тригонометрична форма подання інтервального числа. Залежність між гіперболічними і тригонометричними функціями можна встановити двома способами, які детально розглянуто в роботі [25]. Один із них використовує поняття гіперболічної амплітуди або гудерманіана, другий базується на використанні уявної одиниці – числа i . Гудерманіан аргументу ϕ – ($gd(\phi)$), використаного в (17), визначають по співвідношенню:

$$gd(\phi) = 2 \arctg(e^\phi) - \frac{\pi}{2}. \quad (78)$$

Тоді інтервальне число вигляду (17), перетворене в тригонометричну форму, набуде вигляду:

$$x_t = \rho \left(\frac{1}{\cos(gd(\phi))} + \theta \cdot \operatorname{tg}(gd(\phi)) \right). \quad (79)$$

У роботі [25] наведено співвідношення між гіперболічними і тригонометричними функціями:

$$\cos(i\phi) = \operatorname{ch}(\phi) \quad \sin(i\phi) = i \cdot \operatorname{sh}(\phi). \quad (80)$$

Отже, інтервальне число, визначене в тригонометричній формі, прийме вигляд:

$$x_t = \rho [\cos(i\phi) - i\theta \sin(i\phi)]. \quad (81)$$

Порівняння форм представлення інтервальних чисел, визначених в гіперболічній формі (15) з тригонометричною (78), (81) дозволяє зробити висновок про те, що для подальших обчислень гіперболічна форма зручніша за тригонометричну.

Історико-бібліографічне доповнення

Автори даного повідомлення не ставлять за мету подати докладний виклад подій, пов'язаних з окремими епізодами з історії електротехніки або історії математики. Мета даного розділу – короткий бібліографічний опис перших робіт, в яких викладено застосування комплексних чисел для аналізу ланцюгів змінного струму. Детально життя Ч. П. Штейнмеца і значення для сучасної електротехніки зроблених ним відкриттів описано в [27]. Більшість сучасних студентів-електриків, що читають розклад іспитів, навіть не знають, що читають назви монографій Штейнмеца: «Теоретичні основи електротехніки» або «Теорія і розрахунок електричних ланцюгів».

Слід звернути увагу на таку деталь – на титульному аркуші роботи [1] зазначено, що переклад виконано не просто І. А. Ждановим, а інженером І. А. Ждановим, що свідчить про високий авторитет цього звання на початку ХХ століття.

Застосування комплексних чисел в електротехніці отримало назву символічного методу. Негайно розпочалися дискусії про пріоритет, обґрунтованість

цього методу і таке інше. Будь-яке крупне наукове відкриття супроводжується тим, що в [28] названо «драмою ідей». Її наукові і психологічні особливості розглянуто в [29]. У даний час пріоритет Штейнмеца в застосуванні комплексних чисел в електротехніці загальноновизнаний [30]. Авторам даного повідомлення вдалося знайти роботи [2, 31, 32, 33, 34], мету яких в роботі [32] сформульовано так: «Дана книга призначена як для студентів, так і для інженерів, які прагнуть відновити, доповнити і систематизувати свої пізнання в математиці. Зміст книги визначено бажанням автора дати інженеру-виробничнику, по можливості, той математичний матеріал, який потрібний йому не тільки безпосередньо в практичній діяльності, але і для читання технічної літератури, так само як і для орієнтування в методах розв'язання основних задач його спеціальності. Усвідомлюючи, що цінність математичної теорії для інженера в значній мірі вимірюється можливістю її практичного застосування, автор прагнув довести цю теорію до числа і приділив велику увагу різним обчислювальним, графічним і механічним прийомам, що полегшують набуття наближеного значення величини». Початок роботам такого призначення поклав Штейнмец, опублікувавши в 1910 р. посібник з математики з характерною назвою: «Engineering Mathematics» («Технічна математика»).

З 1893 р. і до кінця свого життя (30 років) Штейнмец працював на фірмі General Electric Company (GEC). За всю історію цієї фірми він був єдиним співробітником, який жодного разу не отримав зарплатню. Фірма надала йому відкритий рахунок. У момент похорон Штейнмеца всі підприємства General Electric на п'ять хвилин припинили роботу. Кажуть, що пісня стає народною, коли її співають всі, а авторів не знає ніхто. Символічний метод Штейнмеца використовують всі інженери і студенти-електрики, але ім'я його невідоме, хоча всім відомі рівні по значенню перетворення Лапласа і функція Хевісайда. Якщо говорити про час, в якому жив Штейнмец і його найясніші сучасники, то краще всього про це сказала Ніка Турбіна:

Досталась доля так себе, нелёгкая судьба,
Ни белой лилии в гербе, ни самого герба.
Когда скончался он – переменялась роль,
И жил не он при короле, а жил при нём король.

Для появи і правильного розуміння символічного методу в інженерному співтоваристві того часу повинні були бути добре відомі операції, пов'язані з комплексними числами. Теорію комплексних чисел до кінця XIX ст. було включено в програми з елементарної і вищої математики багатьох навчальних закладів [35]. Слід зазначити, що автор роботи [35] – Ф. Клейн (1849-1925) відомий не тільки своїм видатним внеском в математику, але і тим, що був першим головою Міжнародної комісії з математичної освіти (1908 р.). Докладний стан викладання теорії комплексних чисел наприкінці XIX ст. та на початку XX ст. розглянуто в роботі [36]. При вивченні вихідних даних цієї роботи слід звернути увагу на автора перекладу і доповнень – І. Ю. Тимченка. Його посада на момент виходу роботи [36] була приват-

доцент. Відповідно до правил тих років [37] приват-доценти були університетськими викладачами, які не входили до складу штатних викладачів і читали лекції, не отримуючи за це грошову винагороду. При вступі на цю посаду вони були зобов'язані прочитати одну або дві публічні (пробні) лекції і (або) захистити дисертацію pro venia legendi, яка давала право на читання лекцій. Авторам даного повідомлення вдалося встановити долю І. Ю. Тимченка [38]. Професор І. Ю. Тимченко працював в Одеському університеті і до 1936 р. був деканом математичного факультету. У 1933-1938 рр. читав курси історії математики, теорії ймовірностей, геометрії. У 1938 р. у віці 75 років І. Ю. Тимченко був заарештований по сфабрикованому звинуваченню і лише весною 1939 р. звільнений «через відсутність доказів». Арешт і рік, проведений у в'язниці, остаточно підірвали його здоров'я. Він помер 30 серпня 1939 р. Ну, як тут не пригадати сумну іронію Юза Алешковського:

Вчера мы хоронили двух марксистов,
Тела одели ярким кумачом.
Один из них был правым уклоном,
Другой, как оказалось, ни при чем.

Особливості викладання теорії комплексних чисел в середніх навчальних закладах Російської Імперії в даний період можна зрозуміти з робіт [39, 40]. Як випливає з авторських передніх слів до цих робіт, вони були призначені для гімназій і реальних училищ. У містах Росії реальні училища з 6-річним і 7-річним терміном навчання існували з 1872 р. На відміну від гімназій головну увагу в реальних училищах приділяли математиці, фізиці, природознавству, стародавні мови в них не вивчали. Випускники реальних училищ не мали права вступу до університетів, але могли продовжувати освіту в технічних, торгових, промислових вищих навчальних закладах. Зрозуміти чому, кажучи сучасною мовою, випускник середнього навчального закладу з поглибленим вивченням фізики і математики не мав права поступати на фізико-математичний факультет університету тільки тому, що не вивчав стародавні мови, але володів в достатньому об'ємі основними мовами техніки і науки того часу – німецькою та французькою, неможливо. Втім, як і неможливо зрозуміти бюрократичну логіку у всі часи. Перш ніж переходити до аналізу робіт [39, 40] слід сказати декілька слів про їх авторів. А. П. Кисельов (1852-1940) – автор легендарного підручника [39], що витримав з 1888 р. по 1965 р. 42 видання.

Приємно відзначити, що на початку трудової діяльності А. П. Кисельову істотну підтримку надав Харківський навчальний округ, що виділив йому в 1879 р. 100 рублів для наукових відряджень. Для порівняння – місячний грошовий оклад поручика складав 70 рублів. У 1890 році протягом року А. П. Кисельов працював у Харкові. А. П. Кисельов закінчив свою діяльність на державній службі в чині титульного радника, проміжного між полковником і генерал-майором [41]. Переклад роботи [40] і написання доповнень до неї, фактично розробку нового підручника, виконав М. І. Білібін (1846-1914), старший сучасник А. П. Кисельова, автор і перекладач

відомих на той час підручників з математики. У відставку Н. І. Білібін вийшов у чині дійсного статського радника (генерал-майора) [42]. Ці два приклади показують, який авторитет у суспільстві і державі мали викладачі гімназій. Останню згадку про використання комплексних чисел у курсі середньої школи автори даного повідомлення змогли знайти в роботі [43]. Порівняння робіт [40], [41], [43] показує, що їх зміст приблизно однаковий. В них розглянуто всі основні дії з комплексними числами, представлені в алгебраїчній та тригонометричній формах. Докладніший аналіз методичних особливостей цих підручників виходить за рамки даного повідомлення. В роботі [39] наведено опис методу визначення квадратного кореня з комплексного числа, записаного в алгебраїчній формі:

$$\sqrt{a+bi} = \begin{cases} \pm \left[\sqrt{\frac{\sqrt{a^2+b^2}+a}{2}} + i\sqrt{\frac{\sqrt{a^2+b^2}-a}{2}} \right], & b > 0; \\ \pm \left[\sqrt{\frac{\sqrt{a^2+b^2}+a}{2}} - i\sqrt{\frac{\sqrt{a^2+b^2}-a}{2}} \right], & b < 0. \end{cases} \quad (82)$$

Детально історію створення Ч. Штейнметцем символічного методу описано в роботі [27]. Проте розповсюдження цього методу не було таким безхмарним, як це описано у вказаній роботі. Щоб переконатися в цьому звернемося до довідника НҮТТЕ [44], [45]. Вже об'єм томів, не менше ніж 1000 стор. у кожному, свідчить про його енциклопедичність. Один з персонажів роботи [46] говорить про довідник НҮТТЕ так: «Хютте – найповніший і найточніший довідник по всіх існуючих розділах фізики і механіки. Для інженера – незамінна настільна книга». У першому томі цього довідника [44] в розділі «Математика» зведення про комплексні числа викладено приблизно так, як це зроблено в сучасних роботах, наприклад в [47]. У той же час у третьому томі цього ж довідника, у відділі «Електротехніка», зведення про застосування комплексних чисел в електротехніці відсутні. У навчальній літературі застосування комплексних чисел при вивченні змінного струму стає обов'язковим з 1911 р. [48]. Прочитавши вихідні

дані книги залишається з ностальгічним смутком роздумувати про часи, коли звання інженера з гордістю писали на титульних аркушах книг, дверних табличках і надмогильних пам'ятниках.

Висновки

1. В роботі розглянуто метод розширення інтервальних чисел, визначених в гіперболічній формі (гіперболічних інтервальних чисел) на поле комплексних чисел. Для цього дійсно та уявну частини комплексного числа подано у формі гіперболічного інтервального числа.

2. Встановлено зв'язки між поданням інтервальних чисел у класичній формі, системі ЦЕНТР-РАДІУС та гіперболічній формі.

3. Запропоновано методи виконання основних арифметичних дій з гіперболічними комплексними числами, а саме: додавання, віднімання, множення та ділення.

4. Запропоновано метод піднесення в цілий додатний степінь комплексного інтервального числа, визначеного в гіперболічній формі.

5. Запропоновано методи обчислення модуля та аргументу комплексного числа, визначеного в гіперболічній формі.

6. Запропоновано метод визначення кореня ступеня n з інтервального комплексного числа, представленого в гіперболічній формі.

7. Використовуючи зв'язки між гіперболічними та тригонометричними функціями запропоновано форму подання інтервального числа в тригонометричній формі.

8. Встановлено, що доцільніше виконувати дії додавання та віднімання з комплексними інтервальними числами, які мають класичну форму, або визначені в системі ЦЕНТР-РАДІУС.

9. Встановлено, що операції множення, ділення та піднесення в цілочисельний степінь найбільш доцільно виконувати з комплексними інтервальними числами, які визначено в гіперболічній формі.

10. Встановлено, що операцію обчислення кореня ступеня n з інтервального комплексного числа, представленого в гіперболічній формі, доцільніше виконувати сумісно з використанням подання інтервального числа в системі ЦЕНТР-РАДІУС та в гіперболічній формі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ (REFERENCE)

1. STEINMETZ С. Р. ТЕОРЕТИЧЕСКІЯ ОСНОВАНІЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ СИЛЬНЫХЪ ТОКОВЪ. Переводъ с немецкаго изданія, просмотреннаго автором. Инж. Жданова. Съ 142 фигурами в текств. С. – ПЕТЕРБУРГЪ, Типографія Б. Н. Фридберга, Б. Сампсоніевскій, 62. 1905.
2. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. Москва: НАУКА, 1964. 772 с.
3. Свеженцева О. В., Умнова М. О. Расчет установившихся режимов радиальной электрической сети на напряжении 0,4 кв интервальным методом. *Вестник Иркутского гос. техн. университета*. 2015. №3 (98). С. 215–222.
4. Крюков А В., Литвинцев А И Интервальное моделирование аварийных режимов электроэнергетических систем. *Системы Методы Технологии*. 2013. № 4(20). С. 73–79.
5. Дубницький В. Ю., Кобилін А. М., Кобилін О. А., Кушнерук Ю. І. EXCEL-орієнтована процедура для обчислення значень спеціальних функцій з інтервальним аргументом, заданим в гіперболічній формі. *Сучасні інформаційні системи*. Т.5, № 4, С. 116-123. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.16>
6. Алефельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. Москва: Мир, 1987. 360 с.
7. Калмыков С. А., Шокин Ю. И., Юлдашев З. Х. Методы интервального анализа. Новосибирск: Наука, 1986. 223 с.
8. Шарый С. П. Конечномерный интервальный анализ. Новосибирск: XYZ, 2012. 606 с.
9. Жуковська О. А. Основи інтервального аналізу. Київ: Освіта України, 2009. 136 с.

10. Молодцов Д. А., Ковков Д. В. Введение в теорию приближенных чисел. *Вестник Тверского государственного университета*. Серия: Прикладная математика. 2011. Том 23. С. 111–128.
11. Співак І. Я., Крепич І. Я. Прикладні аспекти інтервальних обчислень. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 153 с.
12. Кононюк А. Е. Дискретно-непрерывная математика. Алгебры. К.4.Ч.2. К.4: Київ: Освіта України, 2011. 668 с.
13. Смирнова, Е. Н., Максименко Н. В. Элементы интервального анализа. Оренбург: ОГУ, 2015. 62 с.
14. Вербицкий И. Л., Файнберг Е. Д. Элементы теории функций комплексного переменного. Харьков: УЗПИ, 1989. 135 с.
15. Калужнин Л. А. Введение в общую алгебру. Москва: Наука, 1973. 448 с.
16. Стоян Ю. Г. Введення в інтервальну геометрію. Харків: ХІРЕ, 2006. 98 с.
17. Дубницький В. Ю., Кобылин А. М., Кобылин О. А. Вычисление значений элементарных и специальных функций с интервально заданным аргументом, определённым в системе ЦЕНТР – РАДИУС. *Прикладная радиоэлектроника*. 2017. Том 16. №3, 4. С. 147–154.
18. Люстерник Л. А., Червоненкис О. А., Янпольский А. Р. Вычисление элементарных функций. Москва: 1963, 248 с.
19. Попов Б. А., Теслер Г. А. Вычисление функций на ЭВМ. Киев: Наукова думка, 1984. 599 с.
20. Градштейн, И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений: практическое пособие. 4-е изд., переработанное при участии Ю. В. Геронимуса и М. Ю. Цейтлина. Москва: ГИФМЛ, 1963. 1108 с.
21. Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. Москва – Ленинград: ОГИЗ, 1948, 400 с.
22. Левин В. И. Сравнение интервальных чисел и оптимизация систем с интервальными параметрами. *Автоматика и телемеханика*. 2004. № 4. С. 133–143.
23. Левин В. И. Упорядочение интервалов и оптимизация в задачах с интервальными параметрами. *Кибернетика и системный анализ*. 2004. № 3. С. 14–24.
24. Милл-Томсон Л. М., Комри Л. Дж. Четырёхзначные математические таблицы. Москва: ФИЗМАТГИЗ, 1961. 245 с.
25. Янпольский А. Р. Гиперболические функции. Москва: НАУКА, 1960. 195 с.
26. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. Москва: Гардарики, 2002. 638 с.
27. Белькинд Л. Д. ЧАРЛЗ ПРОТЕУС ШТЕЙНМЕЦ. Москва: НАУКА, 1965. 222 с.
28. Данин Д. Избранное. Москва: Советский писатель, 1984. 608 с.
29. Савчук В. С., Романець О. А. Сприйняття науковим товариством нових наукових ідей і теорій (на прикладі становлення класичної електродинаміки). *Питання історії науки і техніки*. 2018, № 1. С. 23–30.
30. Веселовский О. Н., Шнейберг Я. А. Очерки истории электротехники. Москва: МЭИ, 1993. 252 с.
31. Сигорский В. П. Математический аппарат инженера. Киев: ТЕХНІКА, 1977. 764 с.
32. Фихтенгольц Г. М. Математика для инженеров. Часть первая. Москва – Ленинград: ГТТИ, 1931. 487 с.
33. Фихтенгольц Г. М. Математика для инженеров. Часть вторая. Москва – Ленинград: ГТТИ, 1933. 430 с.
34. Philip Alger. Mathematics for Science and Engineering. Based on «Engineering Mathematics». 1957. 372 p.
35. Ф. Клейнъ. Вопросы элементарной и высшей математики. Часть I. АРИΘΜΕΤΙΚΑ, ΑΛΓΕΒΡΑ и АНАЛИЗЪ. Одесса: Изд. MATHESIS, 1912. 407 с.
36. ФЛОРІАНЪ КЭДЖОРИ. ИСТОРИЯ элементарной математики с указаніями на методы преподаванія. Переводъ съ англійскаго под редакціей съ примѣчаніями и прибавленіями И. Ю. Тимченко Приватъ – доцента Императорскаго Новороссійскаго университета. Одесса: Изд. MATHESIS, 1910. 368 с.
37. Пискунов В. И. Правовое положение приват-доцентов Российских Университетов. *Вестник Петербургского Свято-Тихоновского гуманитарного университета*. 2014. Вып. 4 (59). С. 98–116.
38. Шепельский И. В. Иван Юрьевич ТИМЧЕНКО – Математик, механик, историк математики. URL: http://www.emomi.com/history/mechanics_odessa/university/timchenko.htm
39. Киселев А. П. Элементарная алгебра: для классической гимназий и 6-ти кл. реальных училищ. Москва: Типография. М. Г. Волчанинова, 1895. 302 с.
40. ЖОЗЕФЪ БЕРТРАНЪ, АЛГЕБРА для гимназий и реальных училищ Составилъ преимущественно по Бертррану и по другимъ Н. БИЛИБИНЪ, директора С.-Петербургскаго Перваго Реальнаго Училища. Изданіе И. И. Билибина.
41. А. П. Киселев: жизнь и деятельность в Воронежском крае. (Автор не указан). URL: <http://www.microanswers.ru/article/a-p-kiselev-zhizn-i-deyatelnost-v-voronezhskom-krae.html>
42. Шепелев Л. И. Титулы, мундиры, ордена в Российской империи. Ленинград: Наука, 1991. 224 с.
43. Цыпкин А. Г., Пинский А. И. Справочное пособие по методам решения задач по математике для средней школы. Москва: Наука, 1984. 416 с.
44. ХҮТТЕ. Справочник для инженеров и студентов. Том первый. Издание пятнадцатое. Перевод с 26 немецкого издания. Москва-Ленинград: ОНТИ НКТП СССР, 1934. 1003 с.
45. ХҮТТЕ. Справочник для инженеров и студентов. Том второй. Издание пятнадцатое. Перевод с 26 немецкого издания. Москва-Ленинград: ОНТИ НКТП СССР. 1936. 1184 с.
46. Зурков Д., Черепнев И. Служу Престолу и Отечеству. Москва: АСТ, 2018. 346 с.
47. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления. Т. 1. Санкт-Петербург: Мифрил, 1996. 416 с.
48. Д-ръ Адольфъ Томелень, инженеръ. Основы электротехники. Теоретическій и практический курсъ электротехники. Перевод инж.-технолога Д. М. Вержбинскаго под редакціей П. Д. Войнаровскаго, профессора Электротехническаго института ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА III. С. – Петербургъ. Изданіе А. Суворина. 623 с.

Received (Надійшла) 04.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 12.01.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Гадецька Світлана Вікторівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна;

Svitlana Gadetska – Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor, Senior Lecturer of Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: svgadetska@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9125-2363>.

Дубницький Валерій Юрійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник ННІ “Каразінський банківський інститут” ХНУ ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна;

Valeriy Dubnitskiy – Candidate of Technical Sciences, Senior Research, Senior Research of “Karazin Banking Institute” of V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: dubnitskiy@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1924-4104>.

Кушнерук Юрій Іонович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Yuriy Kushneruk – Candidate of Technical Sciences Associate Professor, Senior Lecturer of Ivan Kozhedub, Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine
e-mail: yuriy.kushneruk@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5844-7137>.

Ходирєв Олександр Іванович – старший викладач ННІ “Каразінський банківський інститут” ХНУ ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна;

Alexander Khodyrev – Senior Instructor of “Karazin Banking Institute” of V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: khodyrevmjk3758@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9871-9440>.

Выполнение основных арифметических действий с комплексными числами, которые представлены в интервальной гиперболической форме

С. В. Гадецкая, В. Ю. Дубницький, Ю. И. Кушнерук, А. И. Ходирев

Аннотация. Цель работы. Разработка способов выполнения основных арифметических действий с интервальными комплексными числами, которые представлены в гиперболической форме. **Результаты работы.** В работе рассмотрен метод расширения понятия интервальных чисел, определенных в гиперболической форме (гиперболических интервальных чисел), на поле комплексных чисел. Для этого действительную и мнимую часть комплексного числа представляют в виде гиперболического интервального числа. Установлены связи между представлением интервальных чисел в классической форме, системе ЦЕНТР-РАДИУС и гиперболической форме. Предложены методы выполнения основных арифметических действий с гиперболическими комплексными числами, а именно: сложением, вычитанием, умножением и делением. Предложен метод возведения в целую положительную степень комплексного интервального числа, определенного в гиперболической форме. Предложены методы вычисления модуля и аргумента комплексного числа, определенного в гиперболической форме. Предложен метод определения корня целочисленной степени n из интервального комплексного числа, представленного в гиперболической форме. Используя зависимости между гиперболическими и тригонометрическими функциями, предложены формы преобразования интервального числа, представленного в гиперболической форме в интервальное число, представленное в тригонометрической форме. Установлено, что наиболее целесообразно выполнять действия сложения и вычитания с комплексными интервальными числами, которые имеют классическую форму или определены в системе ЦЕНТР-РАДИУС. Установлено, что операции умножения, деления и возведения в целочисленную степень наиболее целесообразно выполнять с комплексными интервальными числами, определенными в гиперболической форме. Операцию извлечения корня степени n из интервального комплексного числа, представленного в гиперболической форме наиболее целесообразно выполнять с совместным использованием представлений интервального числа в системе ЦЕНТР-РАДИУС и в гиперболической форме.

Ключевые слова: интервальные числа; гиперболическая форма интервального числа; комплексные интервальные числа; арифметические действия с гиперболическими комплексными интервальными числами.

Performance of basic arithmetic actions with complex numbers, which are presented in interval hyperbolic form

Svitlana Gadetska, Valeriy Dubnitskiy, Yuriy Kushneruk, Alexander Khodyrev

Abstract. The goal of the work. Development of methods for performing basic arithmetic operations with interval complex numbers, which are presented in hyperbolic form, their modulus and argument. **Results.** The paper considers the method of extending interval numbers defined in hyperbolic form (hyperbolic interval numbers) to the field of complex numbers. To do this, the real and imaginary part of a complex number is presented in the form of a hyperbolic interval number. The connections between the representation of interval numbers in the classical form, the CENTER-RADIUS system and the hyperbolic form are established. Methods of performing basic arithmetic operations with hyperbolic complex numbers are proposed, namely: addition, subtraction, multiplication and division. A method of raising the positive interval number of a complex interval number defined in a hyperbolic form to an integer positive degree is proposed. Methods for calculating the modulus and argument of a complex number defined in hyperbolic form are proposed. A method for determining the root of a degree from an interval complex number represented in hyperbolic form is proposed. Using the connections between hyperbolic and trigonometric functions, a form of representation of an interval number in trigonometric form is proposed. It is established that it is most expedient to perform addition and subtraction actions with complex interval numbers, which have a classical form or are defined in the CENTER-RADIUS system. The operations of multiplication, division and elevation to an integer power are most expedient to perform with complex interval numbers which are defined in hyperbolic form. The operation of calculating the root of a degree from an interval complex number, presented in hyperbolic form, is most expedient to perform with the combined use of the representation of the interval number in the system CENTER-RADIUS and in hyperbolic form.

Keywords: interval numbers, hyperbolic form of interval number; complex interval numbers; arithmetic operations with hyperbolic complex interval numbers.

Nataliia Haidar, Ganna Zavolodko, Pavlo Pustovoitov

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine

PROCESS OF 3D PRINTING IN ONLINE EDUCATION

Abstract. The subject of the review is methodology of the subsystem verification and printing 3 D-model online learning system mixed type. To do this, a review of analogues, technologies, stages of printing were identified. Due to the development of technology, the educational process is being transformed. Education uses blended learning, part of which is distance learning. **The object of research** is use of additive technologies, which can make the learning process more motivating. Thus, if in distance education there is an opportunity to develop a 3D model online, check it for fidelity, send the model to print, it optimizes the learning process. **The aim is to design** with IP topics that uses the additive technologies in the educational process. **Methods used:** IDEF-diagram describing the function of the system; authentication rules, verification of 3 D models, sending the model to print, selecting a device online, and basic screen forms. **Conclusions.** The development of innovative thinking in higher education students should become a priority of modern higher education, and the introduction of new elements in modern education is inevitable. And given the development of 3D printing technologies, additive technologies are the most promising for the use of visualization in online and mixed teaching.

Keywords: additive technologies; blended learning 3d-model; 3d-printing; rules database; database.

Introduction

Industry 4.0 is emerging more and more clearly. It is clear that enterprises are able to provide a fundamentally new level of productivity and competitiveness, and this is a powerful boost. What will be possible thanks to digital technologies that can process huge data sets and comprehensively manage production - from design and manufacture to logistics and technical support of the product.

Main part

New requirements for learning appear due to the development of technology, and the educational process is transformed. Education uses blended learning, part of which is distance learning. The use of additive technologies allows to make the modeling process more meaningful and progressive. Thus, if in distance education there is an opportunity to develop a 3D model online, check it for fidelity, send a model to print, it optimizes the learning process.

In the analysis of the subject area was identified a structural diagram of the relationship of objects: a teacher, a student, a moderator, an administrator.

The teacher has the opportunity to create distance learning courses, provide knowledge and skills and control this process.

The student has the opportunity to study courses and send reports and 3D models for testing.

In the distance system, which uses additive technologies, it is possible to perform the functions of checking 3D models and sending to print under the supervision of a moderator and a teacher.

There is also an administrator who manages the entire system.

This approach will allow the use of modern devices in distance learning. It will be possible to send models to print and check for basic errors.

Based on the analysis of the subject area, the stages of 3D printing were highlighted. These are creating a digital model, exporting a 3D model in STL format, generating a G-code, preparing a 3D printer for work, printing a 3D model and finishing the object.

In general, the system model can be represented by IDEF0 notation, in which the input data is a formalized task, the mechanism is an analyst, control mechanisms are 3D modeling technologies and printing standards. And the output is a printed model (Fig. 1).

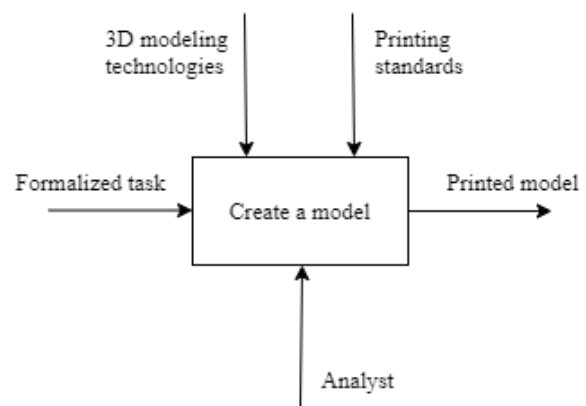


Fig. 1. The first level

The first two levels covered by the system are performed in the modeling tools and send to the system for verification. Validation of the 3D model involves the division into stages, for which the input data can be a developed model.

Thanks to modeling technologies, a digital model is created. Such a model must also meet printing standards. Then the model is sent for printing.

The formalized model is exported to a digital format model. Then this model is exported to STL format using 3D modeling technologies. Then the G-code is generated using a slicer. Next, the criteria are checked to ensure that the model meets the printing standards, and sent to the queue for printing.

There are four categories of users in the system: a student, a teacher, a moderator, an administrator. Certain rights were allocated within the system for each category according to the subject area review scheme.

Opportunities for user actions in the system:

a student: loading models, view download history, receiving messages;

- a teacher: loading models, view download history, receiving messages, view student downloads, granting permission to print;
- a moderator: all that the teacher, print start control, check the operation of devices;
- an administrator: all that the moderator, adding and editing users, making changes to system settings.

The simulated system uses a knowledge based on the production model. Types and subtypes of rules are identified for the correct operation of the system. For each type of rule, there is a subtype that defines the rules that are involved at a particular stage and they are needed for verification. Rules are built with the help of an expert: to add or edit a rule in the database, the user just need to add the required term to the database. Therefore, the method of training with an expert is used.

Rule types: for users; compliance of the 3D model with the requirements; to select a printing device.

Subtypes of inspections: authentication; 3D model checking; sending the model for printing; select a device on the network.

The database stores information of registered users. Login and password are provided to authorize users. Then there is a check in the database whether the user exists or not, and the rights are determined. If the check is successful, the user enters the system itself. If the check is not successful, it is possible to register or re-enter the login and password.

The test scheme is shown in the Fig. 2.

The first two levels covered by the system are performed in the modeling tools and send to the system

for verification. Validation of the 3D model involves the division into stages, for which the input data can be a developed model.

Thanks to modeling technologies, a digital model is created. Such a model must also meet printing standards. Then the model is sent for printing.

The formalized model is exported to a digital format model. Then this model is exported to STL format using 3D modeling technologies. Then the G-code is generated using a slicer. Next, the criteria are checked to ensure that the model meets the printing standards, and sent to the queue for printing.

There are four categories of users in the system: a student, a teacher, a moderator, an administrator. Certain rights were allocated within the system for each category according to the subject area review scheme.

Opportunities for user actions in the system:

a student: loading models, view download history, receiving messages;

– a teacher: loading models, view download history, receiving messages, view student downloads, granting permission to print;

– a moderator: all that the teacher, print start control, check the operation of devices;

– an administrator: all that the moderator, adding and editing users, making changes to system settings.

The simulated system uses a knowledge based on the production model. Types and subtypes of rules are identified for the correct operation of the system. For each type of rule, there is a subtype that defines the rules that are involved at a particular stage and they are needed for verification. Rules are built with the help of an expert: to add or edit a rule in the database, the user just need to add the required term to the database. Therefore, the method of training with an expert is used.

Rule types:

- for users;
- compliance of the 3D model with the requirements;
- to select a printing device.

Subtypes of inspections:

- authentication;
- 3D model checking;
- sending the model for printing;
- select a device on the network.

The database stores information of registered users. Login and password are provided to authorize users. Then there is a check in the database whether the user exists or not, and the rights are determined.

If the check is successful, the user enters the system itself. If the check is not successful, it is possible to register or re-enter the login and password.

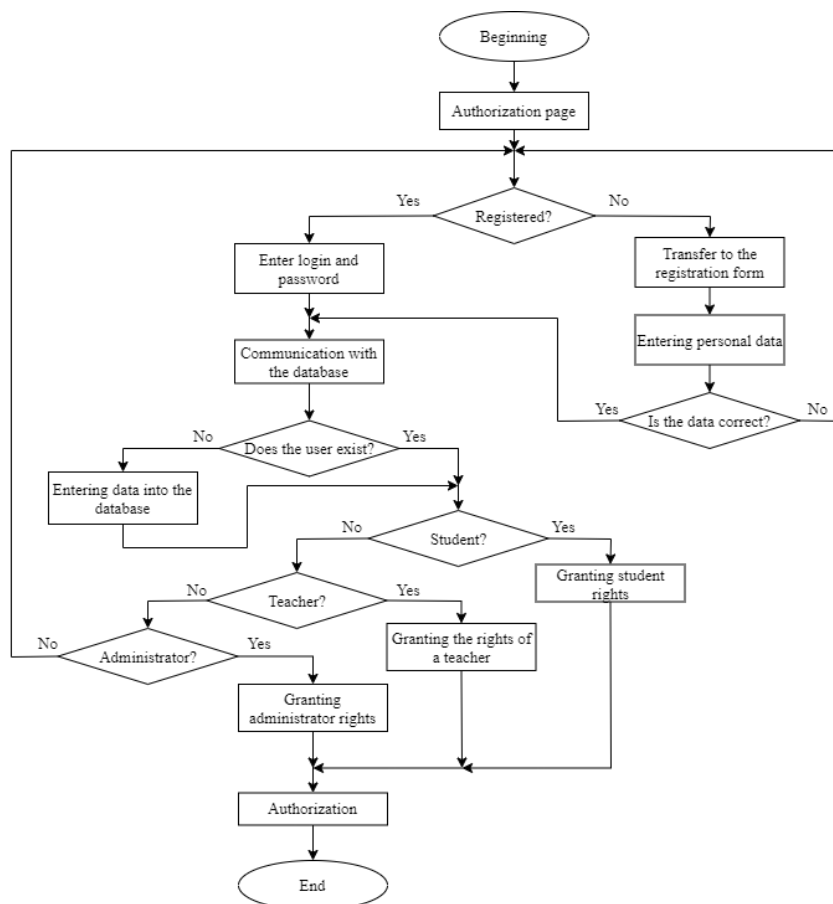


Fig. 2. The scheme of user authorization

Rules:

1) if the user has the identifier Student, then he is granted student rights, otherwise the next check is performed;

2) if the user has the identifier Teacher, then he is granted the rights of a teacher, otherwise the next check is performed;

3) if the user has the identifier Administrator, then he is granted the rights of the administrator, otherwise the user has no rights.

Verification of compliance of the model with the requirements is due to the parse code (Fig. 3).

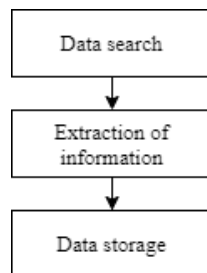


Fig. 3. Stages of syntactical analysis

During the first stage of "Data Search" the source code of the model is loaded. A script starts working with the model. It breaks down all the content, highlighting the necessary information.

During the second stage of "Extraction of information" data search is due to a certain set of characters that describe the purpose of the search.

During the third stage of "Saving Data" information is entered into the database. The result of the parsing is written to the table of identifiers for further processing.

A file with the 3D model is fed to the input model in the unit to check the compliance of the additive model.

The rules in the rule base are used for verification. Since it is not possible to write a parser for a complete analysis of the file, there are the rules that are checked by the analyzer and the rules that are provided for testing to the teacher in the form of a web page.

If the model does not meet the requirements as a result of checking 3D model validation rules, the process exits and the user is sent an error message.

The model unit, which has already been pre-tested for 3D model requirements, is fed into the input device selection check unit.

After the user selected the desired device, system checks whether the selected device meets the requirements for 3D printing or not.

If it is right than the model is sent for printing, if it is false than printing is not allowed and the corresponding message is sent to the user.

The model of the device selection type rule base is shown in Fig. 4.

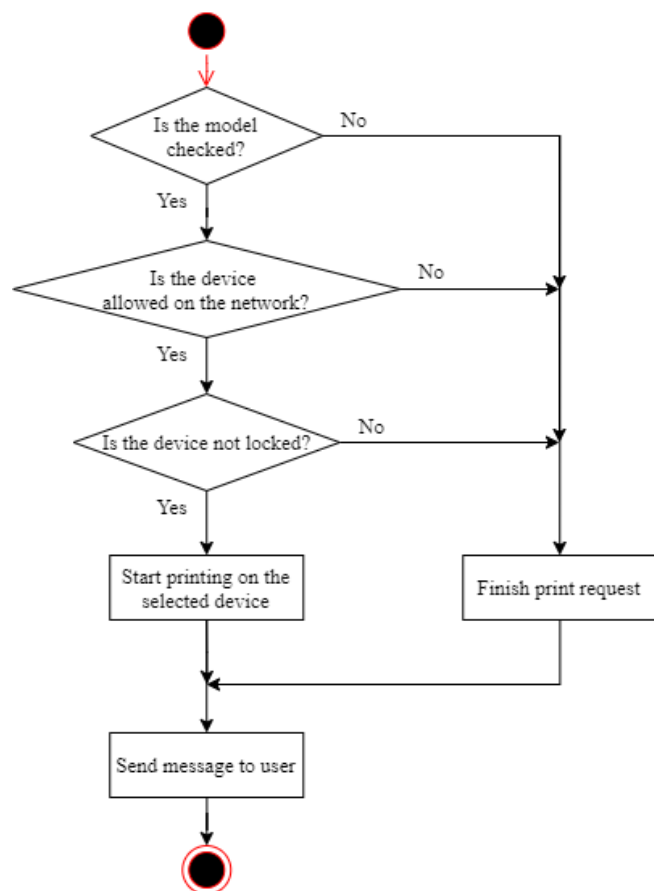


Fig. 4. Model of the base of the rules of the type "device selection in the network"

Requirements:

- the model is tested;
- the device belongs to the permitted network devices;
- the device is not locked.

Conclusions

The development of innovative thinking in higher education students should become a priority of modern higher education, and the introduction of new elements in modern education is inevitable. And given the development of 3D printing technologies, additive technologies are the most promising for the use of visualization in online and mixed teaching.

REFERENCE

1. Muramatsu, Kazuhiro & Wangmo, Sonam (2019), "Collaborative Design Education Using 3D Printing", *Interdisciplinary and International Perspectives on 3D Printing in Education*, IGI Global, pp. 286-305.
2. Chong, S., Pan, G. T., Chin, J., Show, P. L., Yang, T. C. K., & Huang, C. M. (2018), Integration of 3D printing and Industry 4.0 into engineering teaching. *Sustainability*, Vol. 10, Is. 11, No. 3960, DOI: <https://doi.org/10.3390/su10113960>
3. Povzun, V. (2019), "The role of the modern educational technologies in the development of system thinking of university students", *Contemporary Higher Education: Innovative Aspects / Sovremennaya Vysshaya Shkola: Innovatsionnyy Aspect*. Vol. 11 Issue 4, pp. 45-51, DOI: <https://doi.org/10.7442/2071-9620-2019-11-4-45-51>
4. Vorotnikova C. (2019), "Application of modern information technologies in the educational process", *European humanities studies: state and society*, vol. 3, no., pp. 43-51, DOI: <https://doi.org/10.38014/ehs-ss.2019.3-i.04>

5. Gibson I., Rosen D.W. & Strucker B. (2010), *Additive Manufacturing Technologies. Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Springer, 459 p.
6. Ituarte I., Boddetti, N., Hassani, V., Dunn M. and Rosen D. (2019), "Design and additive manufacture of functionally graded structures based on digital materials", *Additive Manufacturing*, vol. 30, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100839>
7. Sysoieva, S. and Osadcha, K. (2019), "Status, technologies and prospects of distance learning in higher education in Ukraine", *Information technologies and learning tools*, vol. 70, no. 2, p. 271, DOI: <https://doi.org/10.33407/itlt.v70i2.2907>
8. Zavalodko, G., Semenets, V. & Svid I. (2020), "Modernization of higher technical education with the use of innovative teaching methods", *Teaching Methods of the European Integration*, Proceedings of the All-Ukrainian scientific-methodical seminar. Within the Erasmus+ project 621046-EPP-1-2020-1-EN-EPPJMO-MODULE European political integration: historical retrospective and nowadays. Hlukhiv, December 15, / Arranged by: O. Chumachenko. Hlukhiv, pp. 43-47.

Received (Надійшла) 05.01.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.02.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Гайдар Наталія Костянтинівна – магістрантка кафедри «Системи інформації ім. В.О. Кравця», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Natalia Haidar – undergraduate, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: natalia.haidar@cit.khpi.edu.ua, ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0001-8292-7632>.

Заволодько Ганна Едвардівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Системи інформації ім. В.О. Кравця», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Ganna Zavalodko – Candidate of Technical Sciences, associate professor of departments "Information system", National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Anna.Zavalodko@khpi.edu.ua, ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0003-0000-8910>.

Пустовойтов Павло Євгенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Системи інформації ім. В.О. Кравця», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Pavlo Pustovoitov – Candidate of Technical Sciences, professor, head of departments "Information system", National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: pavlo.pustovoitov@khpi.edu.ua, ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0003-3884-0200>

Процес 3D друку в онлайн-освіті

Н. К. Гайдар, Г. Е. Заволодько, П. Є. Пустовойтов

Анотація. Предметом огляду є методологія побудови підсистеми друку 3D-моделі системи онлайн-навчання змішаного типу. Для цього було визначено огляд аналогів, технологій, етапів друку. Завдяки розвитку технологій навчальний процес трансформується. В освіті використовується змішане навчання, частиною якого є дистанційне навчання. **Об'єктом дослідження** є використання адитивних технологій, які можуть зробити процес навчання більш мотивованим. Таким чином, якщо в дистанційній освіті є можливість розробити 3D-модель онлайн, перевірити її на вірність, відправити модель на друк, це оптимізує процес навчання. **Метою** є розробка з IP-тем, що використовує адитивні технології в навчальному процесі. **Використані методи:** IDEF- діаграма, що описує функцію системи; правила аутентифікації, перевірка 3D-моделей, відправка моделі на друк, вибір пристрою в режимі онлайн та основні екранні форми. **Висновки.** Розвиток інноваційного мислення у студентів вищих навчальних закладів має стати пріоритетом сучасної вищої освіти, а впровадження нових елементів у сучасну освіту є неминучим. А враховуючи розвиток технологій 3D-друку, адитивні технології є найбільш перспективними для використання візуалізації в онлайн- та змішаному навчанні.

Ключові слова: адитивні технології; змішане навчання; 3d-модель; 3d-друк; база даних правил; база даних.

Процесс 3D печати в онлайн-образовании

Н. К. Гайдар, А. Э. Заволодько, П. Е. Пустовойтов

Аннотация. Предметом обзора является методология построения подсистемы печати 3D модели системы онлайн-обучения смешанного типа. Для этого был определен обзор аналогов, технологий, этапов печати. Благодаря развитию технологий, учебный процесс трансформируется. В образовании используется смешанное обучение, частью которого является дистанционное обучение. **Объектом исследования** является использование аддитивных технологий, которые могут сделать процесс обучения более мотивированным. Таким образом, если в дистанционном образовании есть возможность разработать 3D модель онлайн, проверить ее на верность, отправить модель на печать, это оптимизирует процесс обучения. **Целью** является разработка с IP-тем, использующим аддитивные технологии в учебном процессе. **Использованные методы:** IDEF-диаграмма, описывающая функцию системы; правила аутентификации, проверка 3D-моделей, отправка модели на печать, выбор устройства в режиме онлайн и основные экранные формы. **Выводы.** Развитие инновационного мышления у студентов высших учебных заведений должно стать приоритетом современного высшего образования, а внедрение новых элементов в современное образование неизбежно. А учитывая развитие технологий 3D-печати, аддитивные технологии наиболее перспективны для использования визуализации в онлайн- и смешанном обучении.

Ключевые слова: аддитивные технологии; смешанное обучение; 3d-модель; 3d-печать; база данных правил; база данных.

І. В. Рубан, Н. М. Бологова, В. О. Мартовицький

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДТВЕРДЖЕННЯ ПРАВА ВЛАСНОСТІ НА ЦИФРОВІ ЗОБРАЖЕННЯ

Анотація. У сучасному світі зображення стає потужнішим засобом спілкування. В епоху діджиталізації люди мають змогу виражати свої думки, почуття та інше у вигляді зображень. Головна складність автора завжди полягає у тому, яким чином довести своє авторство. Тому актуальним є розробка новітніх технологій підтвердження авторства на цифрові зображення. Об'єктом дослідження є процес підтвердження автентичності цифрового зображення. Предметом дослідження є інформаційна технологія підтвердження авторства на цифрові зображення, яка використовує цифрові водяні знаки, блокчейн, геш-функції для зображення і IPFS для створення абсолютно нової децентралізованої технології підтвердження права власності у цифрову епоху Інтернету. Що стосується типів файлів, у цій статті згадується лише управління авторськими правами на цифрові зображення. У майбутньому технологію можна буде розширити на аудіо, відео та інші типи мультимедійних файлів, щоб сформувати єдину систему для підтвердження права власності на будь-який цифровий контент.

Ключові слова: автентифікація; цифровий водяний знак; захист права власності; інформаційна технологія; зображення; блокчейн.

Вступ

У сучасному світі зображення стає потужнішим засобом спілкування. В епоху діджиталізації люди мають змогу виражати свої думки, почуття та інше у вигляді зображень. Презентації, слайд-шоу тощо документуються у вигляді електронних копій.

Багато користувачів публікують в інтернеті свої фотографії, у соціальних мережах, в особистих блогах, на корпоративних сайтах, фотобанках, надсилають електронною поштою тощо. Щодня записуються мільярди фотографій та відео. Більшість з них призначені для спільного використання в соціальних мережах і збереження пам'яті, але все більше використовуються нові застосування, такі як доповнена реальність і штучний інтелект.

Згідно звіту Keypoint Intelligence у 2020 році населення світу зробило 1,44 трильйона фотографій [1].

У червні 2021 року консалтингова фірма Rise Above Research, що займається дослідженнями ринку для індустрії цифрових зображень, оцінила, що глобальна цифра зроблених фотографій у 2020 році становить лише 1,12 трильйона [2]. Rise Above Research також прогнозує на кілька років уперед рис. 1 [2], при цьому в 2023 році загальна кількість фотографій може перевищити 1,6 трильйона фотографій.

Цифрові зображення захищені законом про авторське право, як і будь-які інші оригінальні роботи. Авторські права на зображення належать автору з моменту їх створення, якщо він не працює за наймом в агентстві або на іншого роботодавця. І тут авторські права належать агентству чи роботодавцю. Захист авторських прав дає можливість правовласнику визначати, хто копіює, розповсюджує або адаптує зображення для подальшого використання. Єдиний спосіб легального використання зображення, захищеного авторським правом, це отримання ліцензії або доручення правовласника. Головна складність фотографа завжди полягає у тому, яким чином довести своє авторство. Сучасні цифрові камери, навіть дешеві, при певних налаштуваннях відразу вводять дані про влас-

ника фото, але це ще не вихід. Бо до публікації в інтернеті фото зазвичай обробляється у різних редакторах.

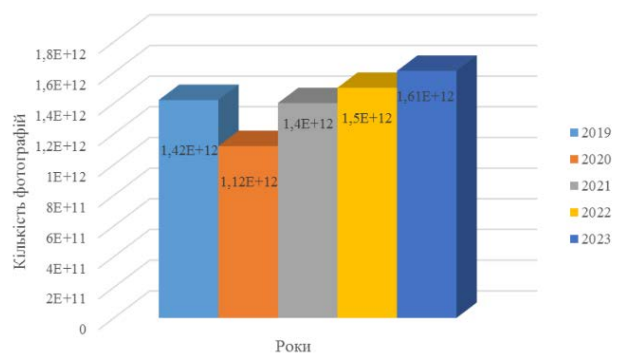


Рис. 1. Кількість зроблених фотографій у світі (Fig. 1. The number of photos taken in the world)

Тому актуальним є розробка новітніх технологій підтвердження авторства на цифрові зображення.

Аналіз сучасного стану в сфері технологій захисту авторських прав на зображення

Реєстрація авторських прав не впливає на факт їх виникнення, оскільки авторські права виникають з моменту створення твору. Проте, ця процедура дозволяє додатково зафіксувати факт створення твору, особу автора та передати державі копію твору для публічного зберігання. У деяких юрисдикціях, наприклад в США, реєстрація авторських прав впливає на обсяг процесуальних прав позивача при захисті авторських прав у суді. Порядок державної реєстрації авторського права визначений в Законах України «Про авторське право і суміжні права» [3] та «Порядку державної реєстрації авторського права і договорів» [4]. Реєстрація здійснюється за допомогою національного органу інтелектуальної власності - державної організації, що входить до державної системи правової охорони інтелектуальної власності, та визначена Кабінетом Міністрів України і має право представляти Україну в міжнародних та регіональних організаціях.

Але порядок державної реєстрації авторського права на зображення, визначений в Законах України, має ряд недоліків, таких як тривалий процес перевірки авторства, відсутність предметної перевірки, складність доказу, висока вартість, централізоване зберігання та інші. Для подолання цих недоліків в статті пропонується технологія підтвердження авторського права заснована на сучасній концепції блокчейн.

Ідея технології блокчейн була описана ще в 1991 році, коли вчені-дослідники Стюарт Хабер та У. Скотт Шторнетта впровадили обчислювально-практичне рішення для цифрових документів зі штампом часу, щоб вони не могли бути оформлені заднім числом або підбитися.

Система використовувала криптографічно закріплені ланцюжки блоків для зберігання документів з позначкою часу. Однак ця технологія не використовувалася, і патент втратив чинність у 2004 році.

У 2004 році вчений у галузі комп'ютерних технологій та криптографічний активіст Хел Фінні представив систему під назвою Reusable Proof Of Work (RPOW). Система працювала, отримавши незмінний або не-взаємозамінний Hashcash токен, заснований на proof of work і підписаний RSA, який потім міг бути переданий від людини до людини.

RPOW вирішив проблему подвійного використання, зберігши право власності на токени, зареєстровані на довіреному сервері, який був розроблений, щоб дозволити користувачам у всьому світі перевірити його правильність та цілісність у режимі реального часу.

На сьогоднішній день сфера використання блокчейн дуже широка від фінансової сфери до програм військового призначення. Також блокчейн знайшов своє використання в сфері захисту інтелектуальної власності.

Так автори статті [5] пропонують заснований на технології блокчейну та алгоритмі вилучення локальних ознак SIFT підхід до реалізації системи цифрового авторського права зображень нового покоління. Алгоритм SIFT використовується для отримання інваріантних характеристик зображення, таких як кут огляду, яскравість, поворот та інші, які складають локальний набір векторів ознак зображення, і ці набори локальних векторів ознак вважаються єдиною основою авторського права для зображення. Однак недоліком такого підходу є те, що алгоритм SIFT опирається на побудову ключових точок і, якщо злоумисник захоче підробити зображення, то йому достатньо буде направити вектор атаки на модифікацію цих ключових точок. Але алгоритм SIFT можна використовувати для пошуку дублікатів в системі, оскільки алгоритм SIFT може вирішити певною мірою інваріантність наступних операцій:

- обертання;
- масштабування (RST);
- афінність зображення / перетворення проєкції (кут огляду);
- освітлення;
- цільова оклюзія;
- хаотичність;
- шум.

В статті [6] представлено підхід до захисту інтелектуальної власності в процесі 3D-друку за допомогою технології блокчейн. В роботі описується використання управління цифровими правами як ключової технології для успішного переходу до методів адитивного виробництва, ключа для її комерційного впровадження та запобігання крадіжці інтелектуальної власності.

За допомогою такого підходу можливо ідентифікувати на якому етапі відбулася крадіжка інтелектуальної власності. На сьогодні даний підхід розробляють в рамках платформи безпечного адитивного виробництва SAMPL.

Беручи до уваги сучасні тренди та результати застосування блокчейн для захисту авторських прав [5-6] в даній роботі пропонується інформаційна технологія підтвердження права власності на цифрові зображення, що ґрунтується на технології блокчейн та цифрових водяних знаках для забезпечення надійної гарантії встановлення авторських прав.

Опис інформаційної технології підтвердження права власності на цифрові зображення

Відповідно до моделі автентифікації цифрових зображень, яка детально представлена в роботі [7], пропонується наступна загальна схема інформаційної технології підтвердження права власності на цифрові зображення, рис. 2.

Процес підтвердження права власності на цифрове зображення пропонується проводити за етапами, які представлені на рис. 3.

З рис. 3 можемо виділити основні процеси, які забезпечують роботу технології підтвердження права власності на цифрове зображення:

- 1) реєстрація користувачів відповідними органами та компаніями, які відповідають за реєстрацію права власності. За результатами цього користувач отримує права на внесення своїх зображень в систему та згідно з технологією блокчейн смарт-контракт, який буде його ідентифікатором в системі та дозволить здійснювати передачу авторських прав на зображення;

- 2) перевірка зображення на наявність цифрового водяного знаку та пошук дублікату зображення. Цей процес забезпечує захист від можливих повторних підписів захищених зображень та пошук дублікатів зображень для уникнення різного роду колізій;

- 3) генерація цифрового водяного знаку. Даний процес на основі даних користувача (смарт-контракт користувача), вхідного зображення створює смарт-контракт зображення та формування на його основі цифрового водяного знаку. Смарт-контракт зображення містить інформацію про зображення, про правовласника та час внесення в систему. За допомогою цього смарт-контракту відповідно до блокчейн технології відбувається підтвердження права власності та можливість його передачі в комерційних цілях;

- 4) нанесення цифрового підпису на зображення. Даний процес на основі згенерованого ЦВЗ наносить підпис цифрового зображення та видає користувачеві захищену копію зображення. Також даний процес

після підпису зображення забезпечує збереження оригіналу зображення у розподіленій системі зберігання даних IPFS та внесення інформації про захищене зображення до блокчейн сховища;

5) перевірка автентичності зображення. Даний процес забезпечує локалізацію та вилучення цифрового водяного знаку з зображення, після чого переві-

ряє автентичність смарт-контракт зображення відповідно до технології блокчейн, цим самим забезпечуючи достовірність права власності на цифрове зображення;

Для реалізації даної технології була розроблена архітектура системи підтвердження права власності на цифрове зображення, яка представлена на рис. 4.

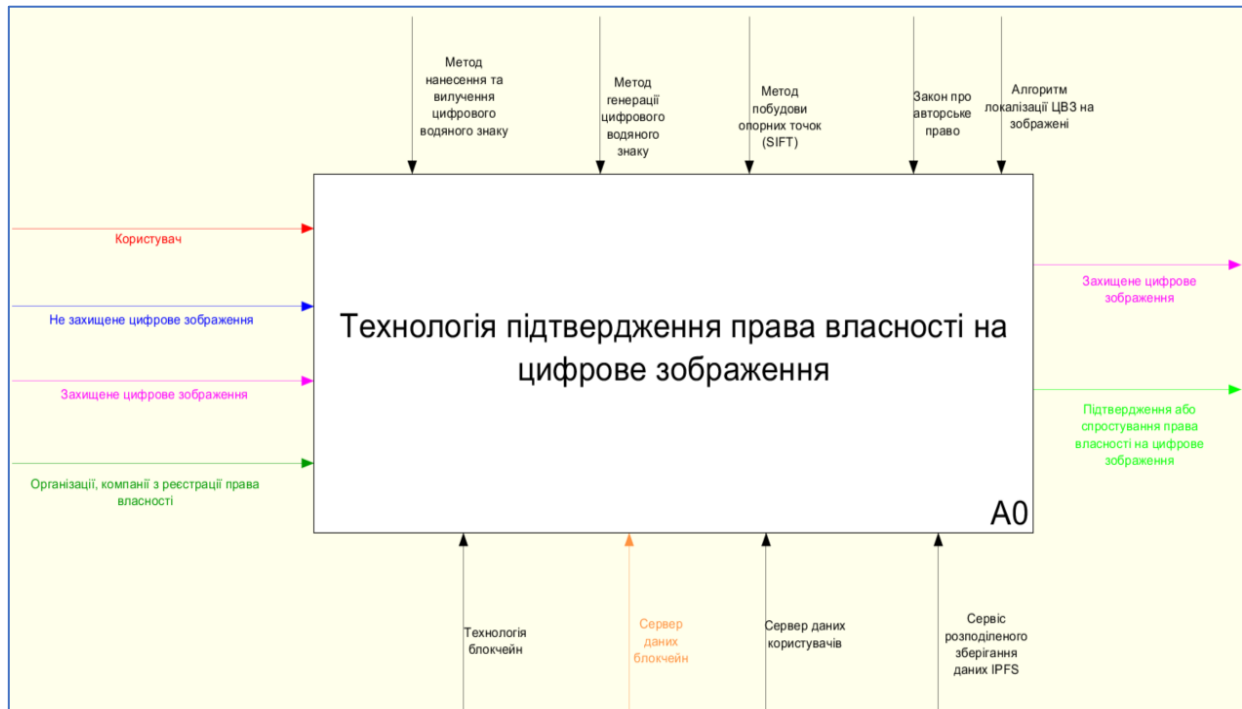


Рис. 2. Загальна схема інформаційної технології підтвердження права власності на цифрові зображення
(Fig. 2. General scheme of information technology confirmation of ownership on digital images)

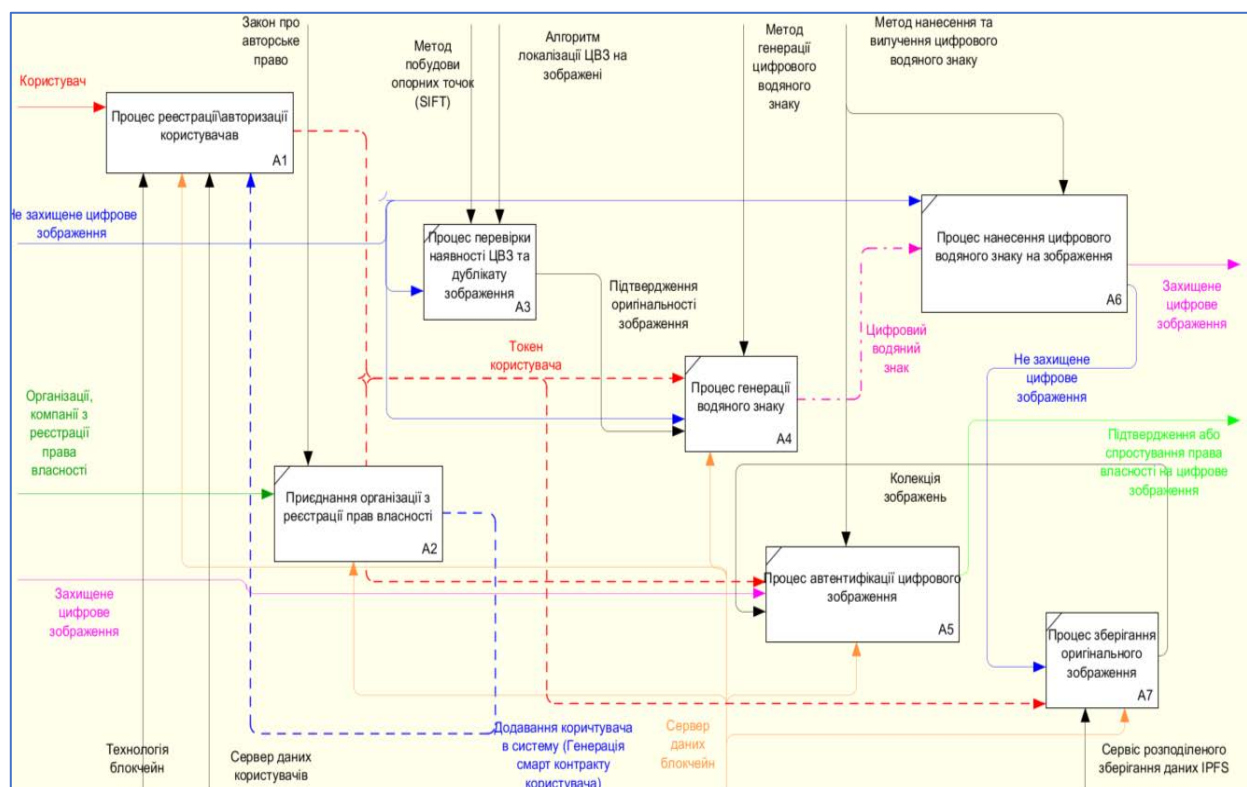


Рис. 3. Етапи процесу підтвердження права власності на цифрове зображення
(**Fig. 3.** Stages of confirming process of the ownership on a digital image)

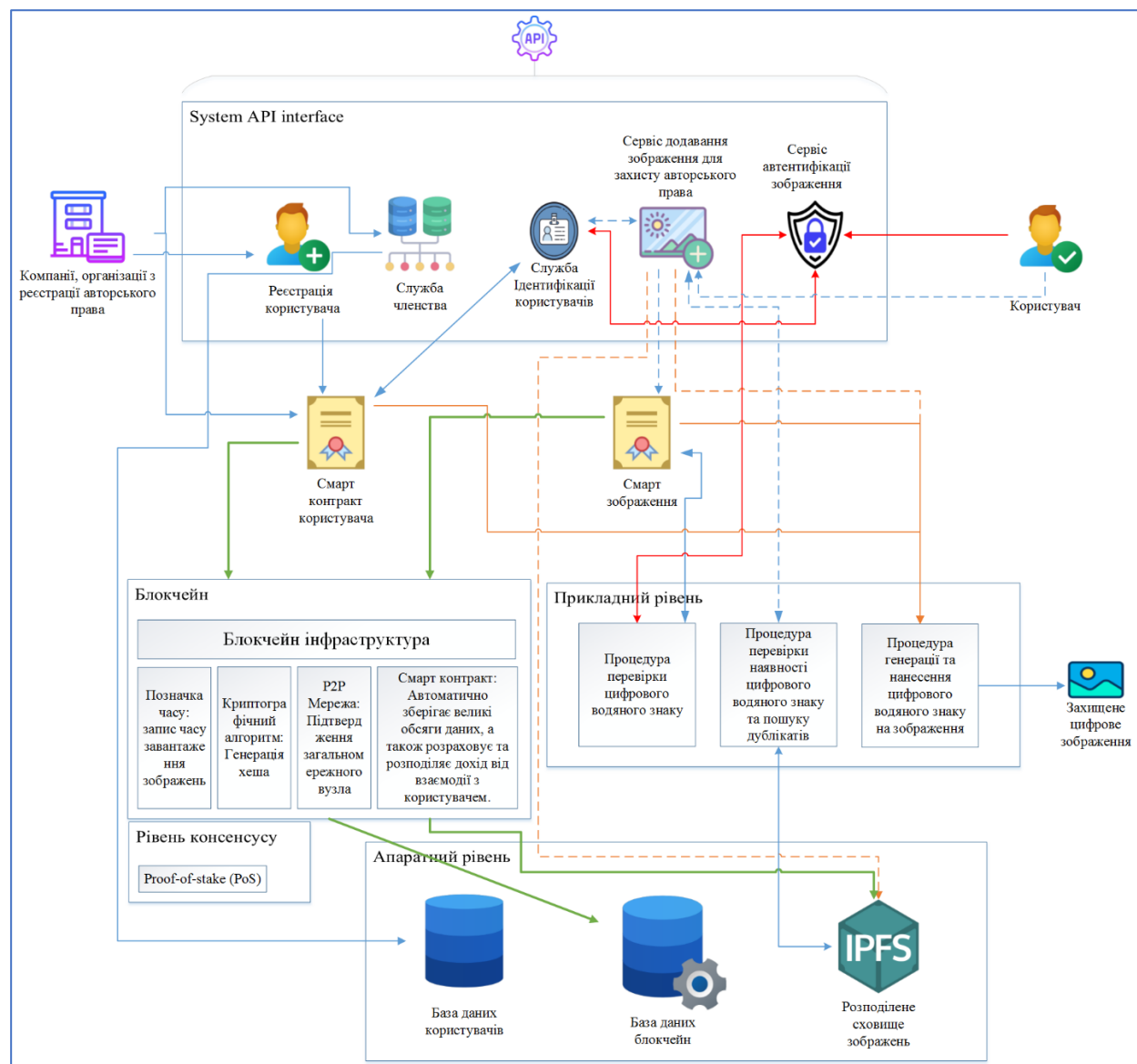


Рис. 4. Процес підтвердження права власності на цифрове зображення
(Fig. 4. The process of confirming ownership of a digital image)

На рис. 4 показаний процес підтвердження автентичності цифрового зображення, який включає в себе обробку даних поза ланцюжком блокчейн і обробку даних в мережі блокчейн. Враховуючи різноманітність організацій, сервісів та систем, які можуть надавати послуги реєстрації авторського права, з точки зору структури збережених даних та функціональних можливостей доцільно запропонувати Rest API-рішення, як універсальну технологію для інтеграції таких систем та платформи обміну блокчейнами.

API-інтерфейс системи дозволяє всім зацікавленим особам та організаціям здійснювати основні операції з нею, такі як:

- приєднання нової організації забезпечення права власності;
- створення відповідними організаціями користувачів системи (реєстрація користувача);
- додавання зображення для захисту права власності на нього;
- перевірка автентичності зображення. Весь процес перевірки поділяється на дві процедури, за-

лежно від потреб організацій. Перша процедура – автентифікація власника захищеного зображення за допомогою смарт-контракту користувача. Друга процедура автентифікації – отримання детальної інформації про захищене цифрове зображення за допомогою смарт-контракту зображення.

Прикладний рівень забезпечує реалізацію основних процесів захисту та автентифікації цифрових зображень. Він надає інтерфейс користувача, за допомогою якого здійснюється процедура нанесення цифрового підпису та автентифікації зображення. Також саме через цей рівень здійснюється процедура зберігання зображень, які підлягають захисту авторського права.

Рівень блокчейн. Цей процес починається зі створення «Початкового блоку» для кожного зареєстрованого в системі користувача, який хоче забезпечити підтвердження авторства на свої цифрові зображення. Після чого всі транзакції записуються в блокчейн. Кожен блок містить унікальний заголовок, що ідентифікується по хешу заголовка блоку. Блок складається з таких компонентів: хеш попереднього блоку, інформація про

правовласника, хеш-зображення, яке захищається, і мітка часу. Цей процес повторюється кожен раз коли користувач додає нове зображення в систему.

Рівень консенсусу. Оскільки система базується на блокчейн технології, то вона є децентралізованою і не контролюється жодною з організацій реєстрації авторського права. Тому потрібен спосіб перевірки транзакцій в системі. Одним з методів, який використовують багато систем, заснованих на блокчейн, є доказ частки (Proof of Stak). Цей метод є альтернативою методу доказу роботи (Proof of Work), першим механізмом консенсусу, розробленим для криптовалют. Оскільки доказ частки (Proof of Stak) набагато енергоефективніший, тому він пропонується для перевірки транзакцій в системі. Модель proof-of-stake дозволяє власникам робити ставки на активи системи та створювати свої власні вузли-валідатори. Стейкінг - це процес, коли учасник мережі блокчейн зобов'язується використовувати свої активи для перевірки транзакцій. Коли блок транзакцій буде готовий для обробки протокол підтвердження частки обертає вузол-валідатор для перевірки блоку. Валідатор перевіряє правильність транзакцій у блоці. Якщо це так, вони додають блок у ланцюжок блоків та отримують крипто-нагороди за свій внесок. Однак, якщо валідатор пропонує додати блок з неточною інформацією, він втрачає частину своїх стейкінгових активів як штраф.

Апаратний рівень. Як показано на рис. 4 апаратний рівень складається з трьох основних компонентів:

- сховища авторизованих користувачів – централізованої база даних організації (державних органів, організацій забезпечення права власності), зареєстрованих як користувачі. Він використовує службу

членства, яка має доступ до отримання даних за допомогою RestAPI.

- сховища блокчейн даних – блокчейн консорціуму, який функціонує під керівництвом групи організацій, що забезпечує спільну трансформацію бізнесу між організаціями. У даному випадку координатор призначає унікальний доступ для кожного користувача (державних органів, організацій забезпечення права власності).

- розподіленого сховища – децентралізованого сховища зображень, для яких система забезпечує можливість підтвердження автентичності.

Висновки

Враховуючи загальнодоступність мережі Інтернет і постійне зростання випадків порушення авторського права на цифровий контент, сучасні технології, що використовуються для захисту авторських прав, мають бути вдосконалені.

У роботі запропонована інформаційна технологія підтвердження права власності на цифрові зображення, яка використовує цифрові водяні знаки, блокчейн, геш-функції для зображення і IPFS для створення абсолютно нової децентралізованої технології підтвердження права власності у цифрову епоху Інтернету.

Що стосується типів файлів, у цій статті згадується лише управління авторськими правами на цифрові зображення. У майбутньому технологію можна буде розширити на аудіо, відео та інші типи мультимедійних файлів, щоб сформувати єдину систему для підтвердження права власності на будь-який цифровий контент.

REFERENCE

1. (2020), *Research analysts crunch the statistics and come up with a mind-blowing number*, available at: <https://blog.mylio.com/how-many-photos-will-be-taken-in-2020>.
2. (2021), *Rise Above Research is a market intelligence and strategic consulting firm for the digital imaging industry*, Worldwide Image Capture Forecast: 2020 – 2025, available at: <https://riseaboveresearch.com/rar-reports/2021-worldwide-image-capture-forecast-2020-2025>.
3. (2001), “ZAKON UKRAINY Pro avtorske pravo i sumizhni prava”, Verkhovna Rada Ukrainy Zakonodavstvo Ukrainy, available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1756-2001-%D0%BF#Text>.
4. (2001), “POSTANOVA vid 27 hrudnia 2001 r. № 1756 Pro derzhavnu reiest-ratsiiu avtorskoho prava i dohovoriv, yaki stosluiatsia prava avtora na tvir”, Verkhovna Rada Ukrainy Zakonodavstvo Ukrainy, available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3792-12#Text>.
5. Shi, Jianfeng, Yi, Dian & Kuang, Jian (2019), “A blockchain and sift based system for image copyright protection”, *ICBTA 2019: Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Blockchain Technology and Applications*, December 2019, pp. 1–6, DOI: <https://doi.org/10.1145/3376044.3376051>.
6. Holland, M., Stjepandić J. and Nigischer C. (2018), “Intellectual Property Protection of 3D Print Supply Chain with Blockchain Technology”, *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, pp. 1-8, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICE.2018.8436315>.
7. Ruban, I., Bolohova, N., Martovytskyi, V., & Koptsev, O. (2021), “Digital image authentication model”, *Advanced Information Systems*, Vol. 5, No. 1, pp. 113–117, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.16>.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Research analysts crunch the statistics and come up with a mind-blowing number. 2020. URL: <https://blog.mylio.com/how-many-photos-will-be-taken-in-2020>.
2. Rise Above Research is a market intelligence and strategic consulting firm for the digital imaging industry. 2021 Worldwide Image Capture Forecast: 2020 – 2025. 2021. URL: <https://riseaboveresearch.com/rar-reports/2021-worldwide-image-capture-forecast-2020-2025>.
3. ЗАКОН УКРАЇНИ Про авторське право і суміжні права. Верховна Рада України Законодавство України 2001. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1756-2001-%D0%BF#Text>.

4. ПОСТАНОВА від 27 грудня 2001 р. № 1756 Про державну реєстрацію авторського права і договорів, які стосуються права автора на твір. *Верховна Рада України Законодавство України*. 2001. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3792-12#Text>.
5. Shi Jianfeng, Yi Dian, Kuang Jian. A blockchain and sift based system for image copyright protection. *ICBTA 2019: Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Blockchain Technology and Applications*. December 2019. P. 1–6, DOI: <https://doi.org/10.1145/3376044.3376051>.
6. Holland M., Stjepandić J., Nigischer C. Intellectual Property Protection of 3D Print Supply Chain with Blockchain Technology. *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*. 2018. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICE.2018.8436315>.
7. Ruban I., Bolohova N., Martovytskyi V., Koptsev O. Digital image authentication model. *Advanced Information Systems*. 2021. Том 5. № 1. С. 113–117. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.16>

Received (Надійшла) 11.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.01.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Рубан Ігор Вікторович – доктор технічних наук, професор, перший проректор Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна;

Igor Ruban – Doctor of Technical Sciences, Doctor, The first vice-rector of Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: igor.ruban@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4738-3286>.

Бологова Наталія Миколаївна – аспірантка, асистент кафедри ЕОМ Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна;

Nataliia Bolohova – Postgraduate, Assistant of computer departments, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: nataliia.bolohova@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8927-0055>.

Мартовицький Віталій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ЕОМ Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна;

Vitalii Martovytskyi – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Associate professor of computer departments, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: vitalii.martovytskyi@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2349-0578>.

Информационная технология подтверждения права собственности на цифровые изображение

И. В. Рубан, Н. Н. Бологова, В. А. Мартовицкий

Аннотация. В современном мире изображение становится более мощным средством общения. В эпоху дигитализации люди могут выражать свои мысли, чувства и прочее посредством изображений. Главная сложность автора всегда состоит в том, каким образом доказать свое авторство. Поэтому актуальна разработка новейших технологий подтверждения авторства на цифровые изображения. Объектом исследования является процесс подтверждения факта право обладания цифровым изображением. Предметом исследования является информационная технология доказательства авторства на цифровые изображения. В работе предложена информационная технология подтверждения права собственности на цифровые изображения, использующая цифровые водяные знаки, блокчейн, хэш-функцию для изображения и IPFS для создания совершенно новой децентрализованной технологии подтверждения права собственности в цифровую эпоху Интернета. Что касается типов файлов, то в этой статье упоминается только управление авторскими правами на цифровые изображения. В будущем технологию можно будет расширить на аудио, видео и другие типы мультимедийных файлов, чтобы создать единую систему для подтверждения права собственности на любой цифровой контент.

Ключевые слова: аутентификация; цифровой водяной знак; защита права собственности; информационная технология; изображение; блокчейн.

Information technology for confirming property rights to digital images

Igor Ruban, Nataliia Bolohova, Vitalii Martovytskyi

Abstract. In the modern world, the image is becoming a more powerful means of communication. In the era of digitalization, people can express their thoughts, feelings, and more through images. The main difficulty of the author is always how to prove his authorship. Therefore, the development of the latest technologies for confirming authorship of digital images is relevant. The object of the study is the process of confirming the fact of the right to own a digital image. The subject of the study is the information technology of proof of authorship for digital images. Taking into account modern trends and results of using blockchain for copyright protection, this paper proposes an information technology for confirming ownership of digital images based on blockchain technology and digital watermarks to provide a reliable guarantee of copyright establishment. Proposed digital image ownership information technology using digital watermarking, blockchain, image hash function and IPFS to create a brand new decentralized ownership verification technology in the digital age of the Internet. As far as file types are concerned, this article only mentions digital image copyright management. In the future, the technology could be extended to include audio, video, and other types of media files to create a single system for verifying ownership of any digital content.

Keywords: authentication; digital watermark; property protection; information technology; image; blockchain.

Aleksandr Serkov, Vitalii Breslavets, Juliya Breslavets, Igor Yakovenko

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

EXCITATION OF OWN OSCILLATIONS IN SEMICONDUCTOR COMPONENTS OF RADIO PRODUCTS UNDER THE EXPOSURE OF THIRD-PARTY ELECTROMAGNETIC RADIATION

Abstract. The **subject** matter is the processes of analysis and mechanisms of interaction of EMP-induced currents and voltages with the processes characterizing the functional purpose of radio products, is usually carried out within the framework of the theory of distributed circuits. The presented approach makes it possible to evaluate the performance criteria in general (for example, to evaluate the critical energy characterizing a thermal breakdown), however, issues related to the determination of various types of electromagnetic interactions that occur directly in the components of a product under the influence of EMR remain open. The **aim** is the possibility of setting up theoretical and experimental studies based on the proposed calculation model for excitation of natural vibrations of a semiconductor structure (exponential growth of amplitude). The parameters of a third-party pulsed electromagnetic field, induced currents and characteristics of semiconductor devices have been established within which the regime of amplification of natural vibrations of a semiconductor structure is observed. The **objectives** are: mechanisms of interaction of induced currents with surface vibrations of semiconductor components of a radio product under the influence of pulsed electromagnetic radiation. The **methods** used are: methods of the theory of small perturbations in determining the spectrum of natural oscillations of the system - currents induced by electromagnetic radiation and natural oscillations of the components of the radio product. The following results are obtained: The mechanisms for the appearance of reversible failures of semiconductor components of radio products under the influence of third-party pulsed electromagnetic fields are determined. It has been established that the presence of a current induced by external radiation leads to the establishment of a mode of amplification of natural oscillations of semiconductor components of a radio product (reversible failures). **Conclusion.** Quantitative estimates of amplification (generation) modes of oscillations of semiconductor devices, distorting their performance depending on the parameters of external electromagnetic influence, allows developing mechanisms for electromagnetic compatibility of microwave radio products. A comparative analysis of the calculated data obtained in the work can be used in the manufacture of radio devices operating in the millimeter and submillimeter range (amplifiers, generators and frequency converters).

Keywords: induced current; electromagnetic pulse radiation; semiconductor components; surface oscillations; oscillation instability.

Introduction

The types of failures of electrical and radio products in the presence of third-party factors are divided into reversible and irreversible [1, 2]. Irreversible failures occur when the performance of a radio product in the presence of external electromagnetic radiation exceeds the permissible limits and the device completely loses its functionality. Reversible failures are characterized by a temporary loss of performance for the time of exposure to electromagnetic radiation. In the absence of electromagnetic influence, the performance of the product is restored. The existing theoretical and experimental studies of the influence of pulsed electromagnetic radiation on the performance of electrical and radio products are mainly aimed at studying irreversible failures. At the same time, the purpose of these works is to determine the performance criteria in general (for example, the critical energy that determines the thermal breakdown). Questions related to the physical mechanisms of interaction of induced currents and natural oscillations of components usually remained open.

This work belongs to this area of reversible failure research. It studied the influence of currents induced by external electromagnetic radiation on the waveguide characteristics of semiconductor products, leading to the appearance of reversible failures.

Task solution

In [3-7], the collisionless damping of surface plasmons was studied on the basis of the dispersion

equation, and it is shown that the damping of oscillations is caused by the transformation of the surface plasmon field into Van Kampen waves. It is shown that this effect leads to a change in the current-voltage characteristics of semiconductor devices (the appearance of regions of negative resistance), i.e. reversible failures.

In the presented work, the mechanisms of attenuation of surface oscillations of semiconductor components of radio products are studied, when their interaction with conduction electrons is in the nature of collisions. Similar effects are realized in the case when the value of the electron concentration of induced currents is much less than the concentration of semiconductor carriers. The kinetic equation for surface oscillations has the form [4]:

$$\frac{\partial N_{\bar{q}}}{\partial t} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum |W_{k_1 q k_2}|^2 \delta(E_1 - E_2 - \hbar \omega_{\bar{q}}) \times \\ \times \left[(N_{\bar{q}} + 1) n_{k_1}^- (1 - n_{k_2}^-) - N_{\bar{q}} n_{k_{21}}^- (1 - n_{k_1}^-) \right], \quad (1)$$

where $N_{\bar{q}}$ - the number of plasmons in the state;

$E_{1,2} = \hbar^2 k_{1,2}^2 / (2m)$ - electron energy; $W_{k_1 q k_2}$ - matrix element of electrons between states $k_1 \rightarrow k_2$. The first term on the right side of equation (1) describes the radiation of surface plasmons during the transition of electrons from state to state; the second is the processes of absorption of plasmons during reverse transitions. Plasma medium - a semiconductor structure (medium 1) occupies a region of space $0 \leq y \leq L$

$(\varepsilon_1(\omega) = \varepsilon_0 - \omega_0^2/\omega^2)$, and areas $y < 0$; $y > L$ occupies a dielectric (vacuum) $\varepsilon_2 = \varepsilon_d$.

The penetration depth of the wave field remains small compared to, i.e. the fields are localized at the boundaries independently of each other. We will consider the interaction of electrons and natural vibrations of a semiconductor structure near the boundary.

The Hamiltonian of the interaction of electrons with plasmons, which determines the matrix element, has the form [5]:

$$\hat{H}^{(int)} = -\frac{1}{c} \int \hat{j}(r) \hat{A}(r) dr. \quad (2)$$

Here the vector potential: $\text{div} \vec{A} = 0$; $\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$.

It is expressed through the operators of creation and annihilation of vibrations

$$\hat{a}_q^{(+)}(t) = \hat{a}_q \exp(i\omega t); \quad \hat{a}_q(t) = \hat{a}_q \exp(-i\omega t)$$

in the following way:

$$A_\alpha(\vec{r}, t) = \sum_q A_\alpha(\vec{q}) \vec{e}_\alpha e^{i\vec{q}\vec{r}} [\hat{a}_q(t) + \hat{a}_{-q}^{(+)}(t)];$$

$$e_{1x} = e_{2x} = \frac{q_x}{q\sqrt{2}}; \quad e_{1y} = -e_{2y} = \frac{i}{\sqrt{2}};$$

$$e_{1z} = e_{2z} = q_z / (q\sqrt{2}); \quad q = \sqrt{q_x^2 + q_z^2}; \quad (3)$$

$$\omega_{-q} = \omega_q = \omega;$$

$$q_y = -iq \quad y < 0; \quad q_y = iq \quad y > 0.$$

The value is found as a result of quantization of the energy of the plasmon electromagnetic field [5]

$$\hat{H}^{(em)} = \frac{\omega^2}{8\pi c^2} \int [\hat{A}(\omega, r)]^2 \frac{d}{d\omega} (\omega \varepsilon(\omega)) d\vec{r}, \quad (4)$$

where integration is carried out over the entire region of plasmon localization. Substituting in (4) $[\hat{A}(\omega, r)]^2$, equating

$$H^{(em)} = \sum \frac{\hbar \omega_q}{2} [\hat{a}_q \hat{a}_q^+ + \hat{a}_q^+ \hat{a}_q],$$

we get

$$A_q = \sqrt{4\pi e^2 \hbar q c^2 / (S \omega_q (\varepsilon_0 + \varepsilon_d))},$$

where S - surface area of a semiconductor wafer.

The induced current density operator has the form:

$$\hat{j} = \frac{e\hbar}{2im_0} [\hat{\Psi}^+ \hat{\nabla} \hat{\Psi} - \hat{\Psi} \hat{\nabla} \hat{\Psi}^+];$$

$$\hat{\Psi}^+ = \frac{1}{\sqrt{V}} \sum \hat{b}_k^+(t) \exp(-i(k_x x + k_z z)) \sin k_y y$$

$$\hat{\Psi} = \frac{1}{\sqrt{V}} \sum \hat{b}_k(t) \exp(i(k_x x + k_z z)) \sin k_y y \quad (5)$$

$$V = SL; \quad k_y = \frac{\pi}{L} n; \quad n = 1, 2, 3...$$

where $b_k^{(+)}(t) = b_k^{(+)} e^{iE_k t/\hbar}$; $b_k(t) = b_k e^{-iE_k t/\hbar}$ - operators of creation and annihilation of electrons with wave vector. Having carried out the integration in the expression (2), we obtain:

$$H^{(e3)} = \sum_{k_1 q k_2} W_{k_1 q k_2} b_{k_1}(t) (a_q(t) + a_{-q}^+(t)) b_{k_2}^+(t), \quad (6)$$

$$W_{k_1 q k_2} = \frac{2k_{1y} k_{2y} (k_1^2 - k_2^2) \cdot W_0 q_x}{\frac{q^2 + (k_{2y} - k_{1y})^2}{[q^2 + (k_{2y} - k_{1y})^2]^{-1}} \cdot |q_x|};$$

where

$$W_0 = \sqrt{2\pi e^2 q_x \hbar^3 / (m_0^2 L_y^2 S \omega_q (\varepsilon_0 + \varepsilon_d))}.$$

Given the law of conservation of energy $E_2 = E_1 - \hbar \omega_q$ and assuming

$q^2 \ll (k_{2y} - k_{1y})^2$; $q \ll k_x$; $q \ll k_z$ we get the following expression for the matrix element:

$$|W_{k_1 q k_2}|^2 = W_0^2 \left(\frac{\hbar k_y^{(+)} k_y}{m \omega_q} \right)^2; \quad k_y^+ = \sqrt{k_y^2 + \frac{2m \omega_q}{\hbar}}.$$

Oscillation decrement $\gamma = \frac{1}{2N_q} \frac{\partial N_q}{\partial t}$ determined

by the processes of stimulated emission and absorption of waves by particles: $N_q \gg 1$:

Passing in the kinetic equation (1) from summation to integration ($\sum_{k_y} = \frac{L}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk_y$) we get the following expression for the decrement.

$$\gamma = \frac{W_0^2 V L}{4\pi^3 m \hbar \omega_q^2} \int_{k_y > 0} dk k_y^+ k_y^2 (n_{k^{(+)}} - n_k). \quad (7)$$

Consider the case of a Maxwellian distribution of electrons:

$$n_k = n_0 \frac{(2\pi\hbar)^3}{(2\pi m T)^{3/2}} \exp\left(-\frac{\hbar^2 k^2}{2mT}\right)$$

Substituting the values into formula (7) and using the dispersion law of surface plasmons $\omega_q^2 = \omega_0^2 / (\varepsilon_0 + \varepsilon_d)$ we get:

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{\pi}} q_x v_T \left(\frac{T}{\hbar \omega} \right) \left(\exp\left(-\frac{\hbar \omega}{T}\right) - 1 \right) \times$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} x^2 \sqrt{x^2 + \frac{\hbar \omega}{T}} \exp(-x^2) dx. \quad (8)$$

It is easy to make sure that the formula (7) in the limiting cases gives the same values of the decrement as the expressions (8). In the case of a degenerate electron gas, the difference $n_{k^+} - n_k = n_k (\varepsilon_F + \hbar \omega) - n_k (\varepsilon_F)$

при $\varepsilon_F \gg \hbar \omega$ can be represented as $\frac{\partial n_k}{\partial \varepsilon_F} \hbar \omega$ where

$$\frac{\partial n_k}{\partial \varepsilon_F} = n_k \delta(\varepsilon - \varepsilon_F) ; n_k = 1.$$

As a result of integration (7) we again obtain the expression) for in the case of specular reflection of electrons from the boundary.

Thus, the idea of the interaction of surface plasmons and electrons as a collisional process leads to the same results as the method of dispersion relations. In addition, the use of the homogeneous plasma model is valid not only in the classical but also in the quantum approximation.

Equation (1) makes it possible to study the mechanisms of spontaneous emission of particles when $N_q \ll 1$. Consider the radiation created by a single particle moving at a speed. In this case, it follows from equation (1) at $q_x \ll k_x$; $q_z \ll k_z$:

$$\frac{\partial N_{\vec{q}}}{\partial t} = \frac{4mL}{\hbar^3} \int_0^\infty |W_{k0,ky}|^2 \delta\left(k_0^2 - k_y^2 - \frac{2m\omega_q}{\hbar}\right) dk_y. \quad (9)$$

Taking into account the condition: $k_0^2 \gg 2m\omega_q/\hbar$, let us determine the power of spontaneous emission of an electron:

$$\hbar\omega_q \frac{\partial N_{\vec{q}}}{\partial t} = \frac{4\pi e^2 q v_0^3}{V \omega_0^2}. \quad (10)$$

If the number of particles in the state is equal, then the right side must be multiplied by this value. Let us compare the radiation power with the value of the energy loss of a particle during its reflection from the interface.

The fields created by the particle will be described by the following equations:

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{E}(\vec{r}, t) &= 0; \\ \text{div } \vec{D} &= 4\pi e \delta(x) [\delta(y - v_0 t) + \delta(y - v_0 t)] \delta(z); \\ \vec{D}(\vec{r}, t) &= \int_{-\infty}^t \varepsilon(t - t') \vec{E}(\vec{r}, t') dt'; \quad y > 0. \\ \text{rot } \vec{E}(\vec{r}, t) &= 0; \quad \text{div } \vec{D} = 0; \\ \vec{D}(\vec{r}, t) &= \varepsilon_d \vec{E}(\vec{r}, t); \quad y < 0. \end{aligned} \quad (11)$$

The Fourier components of the electron field have the following form:

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}, t) &= \sum_{q_x, q_z} \int_{-\infty}^\infty \vec{E}(\omega, \vec{q}, y) e^{i(\vec{q}\vec{p} - \omega t)} d\omega; \\ q &= \sqrt{q_x^2 + q_z^2}, \\ E_x(\omega, \vec{q}, y) &= -\frac{ieq_x v_0 \cos(\omega/v_0) y}{\pi^2 \varepsilon(\omega) S(\omega^2 + q^2 v_0^2)}, \\ E_y(\omega, \vec{q}, y) &= -\frac{i\omega \sin(\omega/v_0) y}{\pi^2 \varepsilon(\omega) S(\omega^2 + q^2 v_0^2)} \\ \varepsilon(\omega) &= \int_0^\infty \varepsilon(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau. \end{aligned} \quad (12)$$

Further

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 - \omega_0^2/\omega^2; \quad \omega^2 \gg q^2 v_0^2.$$

To these fields it is necessary to add free fields, which are solutions of homogeneous equations (11) in media "1" - "2":

$$\begin{aligned} E_x(\omega, \vec{q}, y) &= A_1 e^{-qy}, \\ E_y(\omega, \vec{q}, y) &= i \frac{q}{q_x} A_1 e^{-qy}; \quad y > 0; \\ E_x(\omega, \vec{q}, y) &= A_2 e^{qy}, \\ E_y(\omega, \vec{q}, y) &= -i \frac{q}{q_x} A_2 e^{qy}; \quad y < 0. \end{aligned} \quad (13)$$

From the boundary conditions we find:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{ieq_x v_0}{\pi^2 \varepsilon(\omega)} \frac{\varepsilon_d}{(\varepsilon(\omega) + \varepsilon_d)}; \\ A_2 &= -\frac{\varepsilon(\omega)}{\varepsilon_d} A_1. \end{aligned} \quad (14)$$

The normal component of the electric field in medium "1" has the form:

$$\begin{aligned} \vec{E}_y(\vec{r}, t) &= -\frac{8\pi e v_0}{S(\varepsilon(\omega) + \varepsilon_d)} \times \\ &\times \sum_{q_x, q_z} \frac{q}{\omega_q} e^{i\vec{q}\vec{p}} \sin \omega t; \quad t > 0; \\ \vec{E}_y(\vec{r}, t) &= 0; \quad t < 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Analysis

The energy loss of a particle for the excitation of a surface plasmon per unit time $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$ is determined from the equation of motion:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = e v_0 E_y. \quad (16)$$

In this formula, one should substitute the value of the field at the point where the particle is located

$$x = 0; \quad y = v_0 t; \quad z = 0.$$

Next, it is necessary to average the expression for the energy loss over the time of flight by the particle of the region of interaction with the wave in the forward and backward directions: $\tau = 2L/v_0$

Then the average particle energy losses per unit time for excitation.

Then the average particle energy loss per unit time for excitation q - harmonics of the plasmon field takes the form:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\hbar \omega_q \frac{\partial N_{\vec{q}}}{\partial t}. \quad (17)$$

Thus, the loss of particle energy (spontaneous emission of a surface plasmon) arises as a result of the transformation of the Van Kampen wave incident on the

boundary into the plasmon field. Knowing the expression for the matrix element, one can estimate the integral of collisions of electrons with surface plasmons and find the change in the number of electrons $n_{k1} = n_{k0} \delta_{k1k0}$ capable of k_0 upon their transition to the state k as a result of spontaneous emission of surface plasmons ($N_q \rightarrow 0$).

As a result, we get:

$$\frac{\partial n_{k0}}{\partial t} = -n_{k0} \frac{4\pi e^2 q v_0^3}{V \omega_0^2 \hbar \omega_q}; \quad \frac{\partial n_k}{\partial t} = -\frac{\partial n_{k0}}{\partial t}. \quad (18)$$

The electron energy loss in this case during the transition is equal to:

$$E_0 \frac{\partial n_{k0}}{\partial t} + E \frac{\partial n_k}{\partial t} = (E_0 - E) \frac{\partial n_{k0}}{\partial t},$$

where $E_0 - E = \hbar \omega_q; \frac{\partial n_{k0}}{\partial t} = -\frac{\partial N_q}{\partial t}.$

Let us give quantitative estimates. For wafer with transverse dimensions $a = 10^{-1}$ cm, with current density $j \sim 100$ A/cm², ($v_0 = 3 \cdot 10^9$ cm/s, $n_0 \sim 10^{11}$ cm⁻³) energy loss for surface plasmon excitation ($\omega \sim 10^{10}$ s⁻¹, $q \sim 3$ cm⁻¹) equal $\left| \frac{d\varepsilon}{dt} \right| \sim 1$ μW.

For modern semiconductor components of radio products, such losses are quite detectable and can cause

reversible failures (the appearance of segments of current-voltage characteristics with negative resistance).

Conclusions

The mechanisms of attenuation of surface electromagnetic oscillations in semiconductor components of electrical and radio products based on the concepts of Van-Kampen waves are determined. It is shown that the damping of oscillations of this kind is due to the fact that oscillations excite Van Kampen waves at the media interface, which are modulated by the surface wave field and carry the field energy deep into the medium.

A kinetic equation has been obtained that describes the change in the number of surface plasmons as a result of their interaction with conduction electrons; its solutions are given, which determine the decrement of oscillations and the power of spontaneous emission of particles.

The presented approach makes it possible to evaluate the performance criteria of electrical radio products and solve issues related to the description of various kinds of electromagnetic interactions that occur directly in the components of the product when exposed to pulsed radiation.

Quantitative estimates of amplification (generation) modes of oscillations of semiconductor devices, distorting their performance depending on the parameters of external electromagnetic influence, allows developing mechanisms for electromagnetic compatibility of microwave radio products.

REFERENCES

1. Beletsky, N.N., Svetlichny, V.M., Halameida, D.D. & Yakovenko, V.M. (1991), *Electromagnetic phenomena of the microwave range in inhomogeneous semiconductor structures*, Science thought, Kyiv, 216 p.
2. Zi, C. (1984), *Physics of semiconductor devices*, Mir, Moscow, 456 p.
3. Mikhailov, M.I., Razumov, L.D. & Sokolov, S.A. (1979), *Electromagnetic influences on communication facilities*, Radio and communication, Moscow, 225 p.
4. Steele, M. and Vyural, B. (1973), *Interaction of Waves in Solid State Plasma*, Atomizdat, Moscow, 312 p.
5. Myrova, L.O. & Chepizhenko, A.Z. (1988), Ensuring the resistance of communication equipment to ionizing electromagnetic radiation, Radio and communication, Moscow, 235 c.
6. Kravchenko, V.I., Yakovenko, I.V. & Losev, F.V. (2013), "Influence of the flux of charged particles. Induced by external electromagnetic radiation, on the waveguide characteristics of semiconductor components of electrical and radio products", *Bulletin of NTU "KhPI"*, No. 27, pp. 83–89.
7. Kravchenko, V.I., Yakovenko, I.V. & Losev, F.V. (2013), "Attenuation of surface oscillations of semiconductor structures of electrical and radio products under the influence of external electromagnetic radiation", *Bulletin of NTU "KhPI"*, No. 27, pp. 96–103.

Received (Надійшла) 19.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.01.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Серков Александр Анатолійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри систем інформації, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Aleksandr Serkov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Information Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e mail: saa@kpi.kharkov.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6446-5523>.

Бреславець Віталій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри систем інформації, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Vitalii Breslavets – candidate of technical sciences, Associate Professor, Professor of Information Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e mail: bres123@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9954-159X>.

Бреславец Юлія Віталіївна – асистент кафедри систем інформації, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Juliya Breslavets – assistant of Information Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: julietta941@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4530-8028>.

Яковенко Ігор Володимирович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри систем інформації, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Igor Yakovenko – Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Professor of Information Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e mail: yakovenko60iv@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0963-4347>.

Порушення власних коливання напівпровідникових комплектуючих радіовиробів при дії стороннього електромагнітного випромінювання

А. А. Серков, В. С. Бреславец, Ю. В. Бреславец, І. В. Яковенко

Анотація. Предметом дослідження є процес аналізу механізмів взаємодії наведених ЕМІ струмів і напруги з процесами, що характеризують функціональне призначення радіовиробів, зазвичай проводиться в рамках теорії ланцюгів з розподіленими параметрами. Представлений підхід дозволяє оцінити критерії працездатності в цілому (наприклад оцінити критичну енергію, що характеризує тепловий пробій), проте питання пов'язані з визначенням різного роду електромагнітних взаємодій, що протікають безпосередньо в комплектуючих виробі при впливі ЕМІ залишаються відкритими. **Метою дослідження** є можливість постановки теоретичних та експериментальних досліджень на основі запропонованої розрахункової моделі порушення власних коливань напівпровідникової структури (експоненційного зростання амплітуди). Встановлено параметри стороннього імпульсного електромагнітного поля, наведених струмів та характеристик напівпровідникових приладів у межах яких спостерігається режим посилення власних коливань напівпровідникової структури. **Цілі такі:** механізми взаємодії наведених струмів з поверхневими коливаннями напівпровідникових комплектуючих радіовиробу за умов впливу імпульсного електромагнітного випромінювання. **Методи, що застосовувались при дослідженні:** методи теорії малих обурень щодо спектру власних коливань системи - наведені електромагнітним випромінюванням струми і власні коливань комплектуючих радіовиробів. **Отримано такі результати:** Визначено механізми появи оборотних відмов виробів напівпровідникових комплектуючих радіовиробів за умов впливу сторонніх імпульсних електромагнітних полів. Встановлено, що наявність наведеного зовнішнім випромінюванням струму призводить до встановлення режиму посилення власних коливань напівпровідникових комплектуючих радіовиробів (зворотних відмов). **Висновки.** Кількісні оцінки режимів посилення (генерації) коливань напівпровідникових приладів, що спотворюють їх робочі характеристики залежно від параметрів зовнішнього електромагнітного впливу, дозволяє розробляти механізми електромагнітної сумісності радіовиробів НВЧ-діапазону. Порівняльний аналіз, отриманих у роботі розрахункових даних може бути використаний при виготовленні радіовиробів, що працюють у міліметровому та субміліметровому діапазоні (підсилювачів, генераторів та перетворювачів частоти).

Ключові слова: наведений струм; електромагнітне імпульсне випромінювання; напівпровідникові комплектуючі; поверхневі коливання; нестійкість коливань.

Возбуждение собственных колебаний полупроводниковых комплектующих радиоизделий при воздействии стороннего электромагнитного излучения

А. А. Серков, В. С. Бреславец, Ю. В. Бреславец, И. В. Яковенко

Аннотация. Предмет исследования – процесс анализа механизмов взаимодействия наведенных ЭМИ токов и напряжений с процессами, характеризующими функциональное назначение радиоизделий, обычно проводится в рамках теории цепей с распределенными параметрами. Представленный подход позволяет оценить критерии работоспособности в целом (например, оценить критическую энергию, характеризующую тепловую пробой), однако вопросы связанные с определением различного-рода электромагнитных взаимодействий, протекающих непосредственно в комплектующих изделия при воздействии ЭМИ остаются открытыми. **Цель исследования** — возможность постановки теоретических и экспериментальных исследований на основе предложенной расчетной модели возбуждения собственных колебаний полупроводниковой структуры (экспоненциального роста амплитуды). Установлены параметры стороннего импульсного электромагнитного поля, наведенных токов и характеристик полупроводниковых приборов в рамках которых наблюдается режим усиления собственных колебаний полупроводниковой структуры. **Исследованы:** механизмы взаимодействия наведенных токов с поверхностными колебаниями полупроводниковых комплектующих радиоизделия в условиях воздействия импульсного электромагнитного излучения. **Использованы следующие методы:** методы теории малых возмущений при определении спектра собственных колебаний системы - наведенные электромагнитным излучением токи и собственные колебаний комплектующих радиоизделия. **Следующие результаты получены.** Определены механизмы появления обратимых отказов изделий полупроводниковых комплектующих радиоизделий в условиях воздействия сторонних импульсных электромагнитных полей. Установлено, что наличие наведенного внешним излучением тока приводит к установлению режима усиления собственных колебаний полупроводниковых комплектующих радиоизделия (обратимым отказам). **Выводы.** Количественные оценки режимов усиления (генерации) колебаний полупроводниковых приборов, искажающие их рабочие характеристики в зависимости от параметров внешнего электромагнитного воздействия, позволяет разрабатывать механизмы электромагнитной совместимости радиоизделий СВЧ-диапазона. Сравнительный анализ, полученных в работе расчетных данных может быть использован при изготовлении радиоизделий, работающих в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне (усилителей, генераторов и преобразователей частоты).

Ключевые слова: наведенный ток; электромагнитное импульсное излучение; полупроводниковые комплектующие; поверхностные колебания; неустойчивость колебаний.

Т. В. Смірнова, К. О. Буравченко, А. В. Щербань, Е. К. Багдасарян, А. С. Коваленко

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

ПРОЕКТУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРОВАНИХ КАБЕЛЬНИХ СИСТЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ ПІДПРИЄМСТВА

Анотація. Об'єктом дослідження є процес удосконалення мережевої архітектури підприємств з метою подальшої оптимізації виробничих процесів. **Предметом дослідження** є проектування та оптимізація структурованих кабельних систем для автоматизації виробничих процесів підприємства. **Метою роботи** є удосконалення методу проектування та оптимізації структурованих кабельних систем для транспортних потреб мережі стільникового зв'язку для потреб підприємства. **У результаті дослідження** визначено, що процес планування радіомережі для автоматизації виробничих процесів підприємства необхідно виконувати у відповідності до наступної послідовності кроків: проектування покриття радіомережі із визначення місця розташування кожної базової станції (в мережах 5G – gNb) та побудова комунікаційного транспортного сегменту із визначенням місцезнаходження кросових приміщень. У даній роботі проведені дослідження, які стосуються побудови комунікаційного транспортного сегменту із визначенням місцезнаходження кросових приміщень. Для цього визначена область застосування статистичного методу та обґрунтовано вибір місця розташування технічних приміщень кросового поверху. **Висновки.** Дослідження, проведені в даній роботі, дозволили провести розробку методів удосконалення мережевої архітектури підприємств з метою подальшої оптимізації виробничих процесів. В рамках цього було розроблено метод планування мережі 5G для автоматизації виробничих процесів підприємства, що полягає в послідовному забезпеченні проектування покриття радіомережі із визначення місця розташування кожної базової станції з використанням оптимізованої моделі оцінки втрат потужності радіосигналу на шляху розповсюдження з урахуванням обмежень по мінімальній пропускній здатності, кількості підключень та надійності та побудови комунікаційного транспортного сегменту із визначенням оптимального місцезнаходження кросових приміщень. Розроблений метод надає змогу проводити планування оптимальної структури стільникової мережі 5G для оптимізації виробничих процесів, оцінювати та зменшувати сукупні витрати на побудову мережі, при цьому забезпечуючи необхідні показники якості обслуговування вузлів мережі та її надійності.

Ключові слова: структуровані кабельні системи; автоматизація виробничих процесів; технологічні процеси; хмарні сервіси.

Вступ

Сучасні високотехнологічні підприємства можуть сягати дуже великих розмірів, а і відповідно технологічні процеси, які на них забезпечуються, можуть мати дуже складні розгалужені структури. В залежності від типу виробництва, наявної інфраструктури, використовуваних методів тощо комплексний опис, реалізація та моніторинг технологічних процесів може бути дуже складною задачею, для вирішення якої необхідно застосовувати різноманітні методи дослідження. Зважаючи на це, можна виділити дуже перспективний напрям щодо оптимізації високотехнологічних процесів, а саме використання хмарних інформаційних технологій для оптимізації виробничих процесів підприємств різного масштабу [1, 6, 9, 10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Науково обґрунтоване планування й оптимізація інформаційних мереж, які забезпечують надання запитуваних послуг із заданими показниками ефективності функціонування, є дуже складною науково-технічною й економічною проблемою, без вирішення якої неможливе створення інформаційної інфраструктури підприємства, що відповідає всім потребам та сформованим вимогам [2-5]. Тому, дана робота присвячена саме удосконалення існуючих та розробці нових методів побудови сучасної інформаційно-комунікаційної інфраструктури підприємств з метою її подальшого використання для автоматизації виробничих процесів.

Об'єктом дослідження є процес удосконалення мережевої архітектури підприємств з метою подальшої оптимізації виробничих процесів. Метою роботи є удосконалення методу проектування та оптимізації

структурованих кабельних систем для транспортних потреб мережі стільникового зв'язку для потреб підприємства.

Процес планування радіомережі для автоматизації виробничих процесів підприємства необхідно виконувати у відповідності до наступної послідовності кроків:

- проектування покриття радіомережі із визначення місця розташування кожної базової станції (в мережах 5G – gNb);
- побудова комунікаційного транспортного сегменту із визначенням місцезнаходження кросових приміщень.

Наведемо реалізацію другого кроку в деталях нижче.

Проектування та оптимізація структурованих кабельних систем

Обґрунтоване планування й оптимізація безпроводових інформаційних мереж 5G не можлива без проведення розрахунків по проектуванню структурованих кабельних систем (СКС), які забезпечать з'єднання різних частин мережі [2-5]. Проектування горизонтальної підсистеми є найбільш відповідальною частиною проектного етапу розробки СКС. Рішення, прийняті у процесі виконання цих робіт, є визначальними для техніко-економічної ефективності створюваної структурованої кабельної проводки та має суттєвий вплив на капітальні витрати при створенні інформаційних мереж і саме в горизонтальній підсистемі зосереджена основна маса телекомунікаційного обладнання СКС як за номенклатурою, кількістю, так і за вартістю.

Розглянемо два основні методи обчислення кількості кабелю, що витрачається на реалізацію горизонтальної підсистеми [2-5, 7, 8]: метод підсумовування; статистичний метод.

Метод підсумовування полягає у підрахунку довжини траси кожного горизонтального кабелю з наступним додаванням знайдених таким чином значень. До отриманого результату додається певний технологічний запас, а також запас для виконання обробки в місцях з'єднання (МЗ) та на кросових панелях.

Статистичний метод реалізує практично положення центральної граничної теореми теорії ймовірностей. Сутність його полягає у використанні оцінки середньої довжини окремого прокидання для підрахунку загальної довжини горизонтального кабелю, що витрачається на реалізацію конкретної кабельної системи або, точніше, її частини, яка обслуговується окремою кросовою. Сама оцінка здійснюється на основі статистичних закономірностей, які обов'язково виявляються при реалізації будь-якої структурованої кабельної проводки. Деякому збільшенню точності розрахунків за статистичним методом додатково сприяє той факт, що відповідно до стандарту ISO/IEC 11801 довжина кабелів горизонтальної підсистеми не може перевищувати 90 м (для технології Ethernet).

Сутність методу полягає у наступному: довжина будь-якої j -ї траси може бути представлена в наступному вигляді:

$$L_j = v_j + \xi_j,$$

де v_j – довжина кабелю, що прокладається на вертикальних ділянках трас; ξ_j – випадкова величина, що має певний закон розподілу в площі xOy робочої зони, що обслуговується комутаційним обладнанням яке встановлено у цьому технічному приміщенні.

Припустимо, що:

- базові станції gNb обладнані однотипними МЗ і розподілені за площею xOy території, що обслуговується рівномірно;
- розташування технічних приміщень є оптимальним;
- кабельні траси основної маси горизонтальних кабелів влаштовані за одним принципом, тобто з достатньою для практики точністю можна прийняти $v_j = \text{const}$.

У разі виконання зазначених умов функція щільності ймовірності розподілу довжин окремих прокидів є симетричною (має нульову асиметрію). Оцінка середньої довжини кабельної траси при симетричному розподілі може бути знайдена як напівсума довжин найбільшої та найменшої за довжиною кабельних трас.

На підставі зроблених припущень середня довжина кабелю L_{av} , що витрачається на реалізацію одного прокиду, приймається рівною:

$$L_{av} = \frac{(L_{\max} + L_{\min})}{2} K_s + X,$$

де $L_{\max}$ і $L_{\min}$ – довжини кабельної траси від комутаційного елемента, найдальшого від точки введення в кросову, до МЗ відповідно до найближчої і найдальшої базової станції gNb, розрахована з урахуванням

особливостей прокладання кабелю, всіх спусків, підйомів, поворотів, міжповерхових, (за їх наявності) тощо; K_s – коефіцієнт технологічного запасу, рівний 1,1 (10%); X – запас для виконання обробки кабелю.

Далі розраховується загальна кількість N_{cr} кабельних прокидів, на які вистачає однієї котушки кабелю:

$$N_{cr} = L_{cb} / L_{av},$$

де L_{cb} – довжина кабельної котушки.

На останньому кроці отримуємо загальну кількість кабелю L_c , необхідну для створення кабельної системи:

$$L_c = L_{cb} \times N_{to} / N_{cr},$$

де N_{to} , – кількість МЗ в побудованій СКС.

Результат поділу у формулі виходить зазвичай нецілочисельним, тому використовується округлення до цілого числа.

Область застосування статистичного методу.

Довжини кабельних трас, (відповідно до зроблених вище припущень еквівалентно довжинам окремих прокидів горизонтальної підсистеми СКС), можуть вважатися незалежними випадковими величинами. Відповідно до теорії ймовірності, дисперсія середнього арифметичного попарно незалежних випадкових величин у n разів менша дисперсії σ^2 кожної з величин, тобто в застосовуваних позначеннях можна записати:

$$D(l_{cp}) = \sigma^2 / n.$$

Кількість n окремих прокидів, при яких величина середньоквадратичного відхилення середнього арифметичного довжин від математичного очікування не перевищить заздалегідь заданого значення, для визначеності, наприклад 5%, може бути знайдена виходячи з наступного співвідношення:

$$\sigma / (l_{cp} \sqrt{n}) \leq 0,05.$$

При $\sigma / l_{cp} = 0,42$ (припущення на підставі практичного результату), отримуємо, що n має бути не менше 84, тобто застосування статистичного методу є виправданим для розрахунку кабельних систем або їх частин, які обслуговують не менше $N = 42$ комутаційних приладів.

Однією з умов застосування статистичного методу було припущення того, що функція розподілу є симетричною. Обробка даних практично реалізованих проектів показує, що середній коефіцієнт асиметрії дорівнює приблизно 0,44, тобто відмінність функції розподілу від симетричної, строго кажучи, не може вважатися зневажливо малою.

Розглянемо, наскільки ця відмінність впливає на точність розрахунків.

Для цього згідно з методом моментів апроксимуємо фактично одержану функцію розподілу рядом Грама-Шарльє [11], який представляє собою нормальний розподіл з поправкою. Для спрощення подальших розрахунків при побудові ряду в ньому утримується лише два перші члени:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{x^2/2} \left[1 + \frac{\gamma_3}{3!} (x^3 - 3x) + \dots \right], \quad (1)$$

де γ_3 – коефіцієнт асиметрії; $x = (t - Mt)/\sigma$ – стандартизована випадкова величина.

Імовірність того, що довжина горизонтального кабелю не перевищить x , становитиме:

$$\Phi_u(x) = \Phi(x) + \frac{\gamma_3}{3! \sqrt{2\pi}} \cdot (1 - x^2) \cdot e^{x^2/2}, \quad (2)$$

де $\Phi_u(x)$ – апроксимована функція розподілу, $\Phi(x)$ – функція нормального розподілу.

Вибір місця розташування технічних приміщень кросового поверху. Через значну кількість МЗ, що встановлюються в процесі створення горизонтальної проводки СКС, завдання оптимальної побудови нижнього рівня кабельної системи за різними критеріями дозволяє істотно скоротити як обсяг витрат на створення кабельної проводки, так і час реалізації проекту в цілому.

Координати розташування приміщення кросової, що обслуговує МЗ у конкретній робочій зоні та оптимальної за критерієм мінімальної середньої довжини окремого прокидання, збігаються з центром ваги пластинки Ω , що знаходиться в площині xOy . При цьому, форма пластини відповідає топології робочої зони, що обслуговується, а її щільність $\rho(x, y)$ еквівалентна щільності розміщення робочих місць. Координати розташування технічного приміщення розраховуються за такими формулами:

$$x_0 = \frac{1}{M} \iint_{\Omega} \rho x dx dy; \quad y_0 = \frac{1}{M} \iint_{\Omega} \rho y dx dy, \quad (3)$$

де $M = \iint_{\Omega} \rho dx dy$ – загальна кількість базових станцій gNb , що обслуговуються конкретною кросовою.

У тому випадку, якщо робоча площа, що обслуговується, зображена на рис. 1, являє собою прямокутник зі сторонами $(a; b)$ $(c; d)$, а окремі МЗ розподілені по ній рівномірно, тобто $\rho(x, y) = \rho = const$, координати розташування приміщення кросової, оптимальні за критерієм мінімальної сумарної довжини лінійних горизонтальних кабелів, чисельно рівні:

$$x_0 = (b - a)/2; \quad y_0 = (d - c)/2.$$

Раніше було показано, що в цьому випадку середня довжина кабельного прокладання буде близька до

$$l' = ((b - a) + (d - c))/4.$$

При розташуванні технічного приміщення кросової на краю зони обслуговування, наприклад, у точці F (рис. 1), оцінка середньої довжини кабельного прокладання, виконана за тими ж принципами, має значення:

$$l'' = ((b - a) + (d - c))/2.$$

Таким чином, за рахунок оптимізації місця розташування технічного приміщення економія кількості кабелю, що витрачається на реалізацію кожного середньостатистичного прокидання, може досягти:

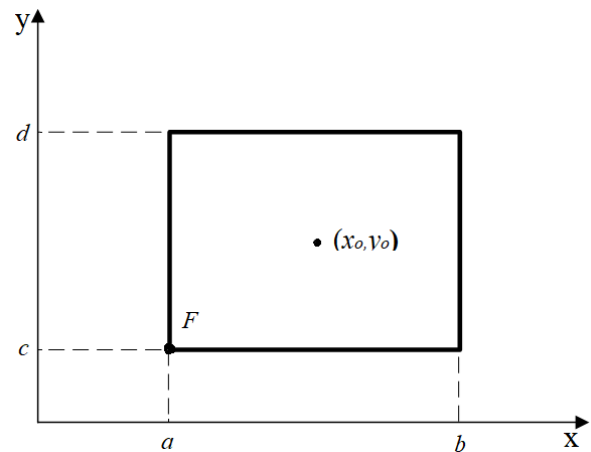


Рис. 1. Ілюстрація до визначення місцезнаходження кросової (Fig. 1. Illustration to determine the location of the cross)

$$\Delta = (l'/l'') \cdot 100 = 50\%.$$

На підставі наведеної теоретичної бази проведено схематичну розробку оптимізації розміщення технічного приміщення кросової рис. 2 для планування ефективної інформаційно-комунікаційної мережі на базі технологій 5G. Керуючись даною схемою можна зробити розрахунки розташування технічного приміщення кросової та обчислити кількості кабелю, що витрачається на реалізацію підсистеми.

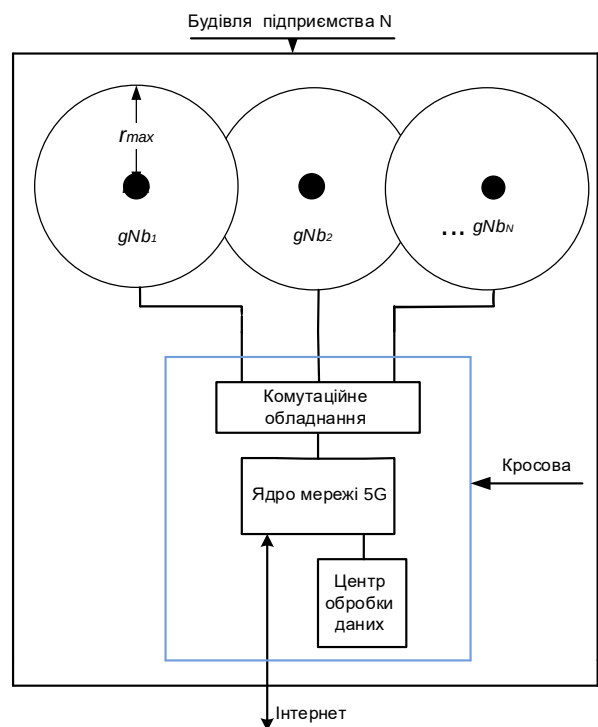


Рис. 2. Графічне представлення мережі, що проектується (Fig. 2. Graphical representation of the projected network)

Висновки

Дослідження, проведені в даній роботі, дозволили провести розробку методів удосконалення мережевої архітектури підприємств з метою подальшої оптимізації виробничих процесів.

В рамках цього було розроблено метод планування мережі 5G для автоматизації виробничих процесів підприємства, що полягає в послідовному забезпеченні проектування покриття радіомережі із визначення місця розташування кожної базової станції з використанням оптимізованої моделі оцінки втрат потужності радіосигналу на шляху розповсюдження з урахуванням обмежень по мінімальній пропускній здатності, кількості підключень та надійності та

побудови комунікаційного транспортного сегменту із визначенням оптимального місцезнаходження кросових приміщень.

Розроблений метод надає змогу проводити планування оптимальної структури стільникової мережі 5G для оптимізації виробничих процесів, оцінювати та зменшувати сукупні витрати на побудову мережі, при цьому забезпечуючи необхідні показники якості обслуговування вузлів мережі та її надійності.

REFERENCES

- Smirnova, T.V., Buravchenko, K.O., Kravchenko, S.S. & Horbov, V.O., Smirnov O.A. (2021), "Khmarna systema pidtrymky pryiniattia rishen tekhnologichnoho protsesu vidnovlennia poverkhon konstrukttsii i detalei mashyn", *Suchasni informatsiini systemy*, Vol. 5, No. 4, pp. 79-95, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.12>.
- Zhykhor, O.B. & Koval, R.A. (2012), "Vybir optymalnoho proektnoho rishennia u sytuatsii nevyznachenosti", *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, Vyp. 22.5, pp. 178-182.
- Kyny, R.L. (1981), *Pryniatye resheniya pry mnohykh kryteriyakh: predpochteniya y zameshcheniya*, Moscow, 560 p.
- Semenov, A.B. (2010), *Proektyrovanye y raschet strukturyrovannykh kabelnykh system y ykh komponentov*, DMK Press, Kompanya AiTy, 416 p.
- Holdshstein, B.S. & Kucheriavy, A.E. (2013), *Sety svyazy post-NGN*, BKhV-Peterburh, SPb, 160 p.
- Tykhvynskiy, V.O., Bochechka, H.S., Nurhozhyn, B.Y. & Aitmahambetov A.Z. (2016), *Sety IoT/M2M: tekhnolohyy, prylozheniya y rehulyrovanye*, Ak-Shahyl, Almaty, 324 p.
- Barabash, O.V. & Mashkov, O.A. (2004), "Vyznachennia kryteriiv i zapasu funktsionalnoi stiiikosti rozpodilenoii informatsiinoi sys-temy", *Aktualni problemy stvorennia i zastosuvannia aviatsiinykh ta kos-michnykh system*, Materialy naukovykh-praktychnoi konferentsii: Zbirnyk naukovykh prats NAOU, NAOU, Kyiv, pp. 62 – 65.
- Fylyn, B. P. (1988), *Metody analiza strukturnoi nadezhnosti setei svyazy*, Radio y svyaz, Moscow, 252 p.
- Smirnova, T.V., Stoliarenko, M.P., Yankov, M.O., Hrudik, V.V. & Motorin, Yu.Iu. (2021), "Model realizatsii struktury tekhnologichnoho protsesu u khmarnomu servisi", *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl*, No. 4(70), pp. 132-142.
- Smirnova, T.V. (2020), "Formuvannia evristychnykh pravyl, bazy znan ta formalizatsiia struktury y pravyl tekhnologichnoho pro-tsesu dlia optymizatsiinoi khmarnoi informatsiinoi systemy", *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, No. 2 (60), pp. 101-104, DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.101>.
- Korn, H. & Korn, T. (1974), *Spravochnik po matematyke dlia nauchnykh rabotnykov y ynzhenerv*, Nauka, Moscow, 832 p.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Смірнова Т.В., Буравченко К.О., Кравченко С.С., Горбов В.О., Смірнов О.А. Хмарна система підтримки прийняття рішень технологічного процесу відновлення поверхонь конструкцій і деталей машин. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Т. 5, № 4. С. 79-95. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.12>.
- Жихор О.Б., Коваль Р.А. Вибір оптимального проектного рішення у ситуації невизначеності. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. Вип. 22.5. С. 178-182/
- Кини Р.Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. Москва, 1981. 560 с.
- Семенов А.Б. Проектирование и расчет структурированных кабельных систем и их компонентов. М.: ДМК Пресс; Компания АйТи, 2010. 416 с.
- Гольдштейн Б.С., Кучерявый А.Е. Сети связи пост-NGN. СПб: БХВ-Петербург, 2013. 160 с.
- Тихвинский В.О., Бочечка Г.С., Нургожин Б.И., Айтмагамбетов А.З. Сети IoT/M2M: технологии, приложения и регулирование. Алматы: Ак-Шагыл, 2016. 324 с.
- Барабаш О.В., Машков О.А. Визначення критеріїв і запасу функціональної стійкості розподіленої інформаційної системи. Матеріали науково-практичної конференції «Актуальні проблеми створення і застосування авіаційних та космічних систем». Збірник наукових праць НАОУ. К.: НАОУ, 2004. С. 62 – 65.
- Филин Б. П. Методы анализа структурной надежности сетей связи. М.: Радио и связь, 1988. 252 с.
- Смірнова Т.В., Столяренко М.П., Янков М.О., Грудік В.В., Моторін Ю.Ю. Модель реалізації структури технологічного процесу у хмарному сервісі. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2021. № 4(70). С. 132-142.
- Смірнова Т.В. Формування евристичних правил, бази знань та формалізація структури й правил технологічного процесу для оптимізаційної хмарної інформаційної системи, Системи управління, навігації та зв'язку. 2020. № 2 (60). С. 101-104. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.101>.
- Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 832 с.

Received (Надійшла) 12.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.01.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Смірнова Тетяна Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

Tetiana Smirnova – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of cybersecurity and software academic department, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine;

e-mail: sm.tetyana@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6896-0612>

Буравченко Костянтин Олегович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

Kostiantyn Buravchenko – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of cybersecurity and software academic department, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine;

e-mail: buravchenkok@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6195-7533>.

Щербань Андрій Васильович – аспірант, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

Andrii Shcherban - PhD graduate student, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine;

e-mail: Cherban1209@gmail.com; ORCID ID: [0000-0001-5382-1812](http://orcid.org/0000-0001-5382-1812).

Багдасарян Едуард Карапетович – аспірант, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

Eduard Bahdasarian - PhD graduate student, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine;

e-mail: dgl1734@icloud.com; ORCID ID: [orcid id 0000-0002-0423-0490](http://orcid.org/0000-0002-0423-0490).

Коваленко Анна Степанівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

Anna Kovalenko – candidate of technical sciences, associate professor of cybersecurity and software academic department, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine;

e-mail: annasun911@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3610-9465>.

Проектирование и оптимизация структурированных кабельных систем для автоматизации производственных процессов предприятия

Т. В. Смирнова, К. О. Буравченко, А. В. Щербань, Э. К. Багдасарян, А. С. Коваленко

Аннотация. **Объектом исследования** является процесс усовершенствования сетевой архитектуры предприятий с целью дальнейшей оптимизации производственных процессов. **Предметом исследования** является проектирование и оптимизация структурированных кабельных систем автоматизации производственных процессов предприятия. **Целью работы** является усовершенствование метода проектирования и оптимизации структурированных кабельных систем для транспортных нужд сети сотовой связи для нужд предприятия. **В результате исследования** определено, что процесс планирования радиосети для автоматизации производственных процессов предприятия необходимо выполнять в соответствии со следующей последовательностью шагов: – проектирование покрытия радиосети по определению местоположения каждой базовой станции (в сетях 5G – gNb); построение коммуникационного транспортного сегмента с определением местонахождения кроссовых помещений. В данной работе проведены исследования, касающиеся построения коммуникационного транспортного сегмента с определением местонахождения кроссовых помещений. Для этого определена область применения статистического метода и обоснован выбор месторасположения технических помещений кроссового этажа. **Выводы.** Исследования, проведенные в данной работе, позволили провести разработку методов усовершенствования сетевой архитектуры предприятий с целью дальнейшей оптимизации производственных процессов. В рамках этого был разработан метод планирования сети 5G для автоматизации производственных процессов предприятия, заключающийся в последовательном обеспечении проектирования покрытия радиосети с определения местоположения каждой базовой станции с использованием оптимизированной модели оценки потерь мощности радиосигнала на пути распространения с учетом ограничений по минимальной пропускной способности, количества подключений и надежности и построения коммуникационного транспортного сегмента с определением оптимального месторасположения кроссовых помещений. Разработанный метод позволяет проводить планирование оптимальной структуры сотовой сети 5G для оптимизации производственных процессов, оценивать и уменьшать совокупные затраты на построение сети, при этом обеспечивая необходимые показатели качества обслуживания узлов сети и ее надежности.

Ключевые слова: структурированные кабельные системы; автоматизация производственных процессов; технологические процессы; облачные сервисы.

Design and optimization of structured cables systems for automation of production processes of the enterprise

Tetiana Smirnova, Kostiantyn Buravchenko, Andrii Shcherban, Eduard Bahdasarian, Anna Kovalenko

Abstract. **The object of research** is the process of improving the network architecture of enterprises in order to further optimize production processes. **The subject of research** is the design and optimization of structured cabling systems to automate the production processes of the enterprise. **The aim of the work** is to improve the method of designing and optimizing structured cabling systems for the transport needs of the cellular network for the needs of the enterprise. **The study determined** that the process of planning a radio network to automate production processes of the enterprise must be performed in accordance with the following sequence of steps: design of radio network coverage to determine the location of each base station (5G - gNb) and construction of communication transport segment with location cross-country premises. In this paper, research is conducted on the construction of a communication transport segment with the location of cross-country premises. For this purpose, the scope of the statistical method is determined and the choice of the location of the technical premises of the cross floor is substantiated. **Conclusions.** The research conducted in this paper allowed to develop methods for improving the network architecture of enterprises in order to further optimize production processes. As part of this, a 5G network planning method was developed to automate the production processes of the enterprise, which is to consistently ensure the design of the radio network coverage to determine the location of each base station using an optimized model to estimate the loss of radio signal power, bandwidth, number of connections and reliability and construction of the communication transport segment with the determination of the optimal location of cross-country premises. The developed method makes it possible to plan the optimal structure of the 5G cellular network to optimize production processes, evaluate and reduce the total cost of building the network, while providing the necessary indicators of service quality of network nodes and its reliability.

Keywords: structured cable systems; automation of production processes; technological processes; cloud services.