



Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"



Сучасні Інформаційні системи

Advanced Information Systems

Sučasni informacijni sistemi

Том 5, № 1

Volume 5, 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 26 лютого 2021 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 • 2021

Редакційна колегія

Головний редактор:

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

Заступник головного редактора:

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

Члени редакційної колегії:

БАЙРАМОВ Азад Агахар огли
(*д-р фіз.-мат. наук, проф., Баку, Азербайджан*);
БЛАУНШТЕЙН Натан Шаєвич
(*д-р фіз.-мат. наук, проф., Беер-Шева, Ізраїль*);
ГНАТЮК Сергій Олександрович
(*д-р техн. наук, доц., Київ, Україна*);
ЗАЙЦЕВА Єлена
(*д-р наук, проф., Жиліна, Словаччина*);
КАРПІНСЬКИЙ Микола Петрович
(*д-р техн. наук, проф., Бельсько-Бяла, Польща*);
КОВАЛЕНКО Андрій Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
КОСТЕНКО Павло Юрійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
КУЧУК Георгій Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ЛИТВИН Василь Володимирович
(*д-р техн. наук, проф., Львів, Україна*);
ЛУКІН Володимир Васильович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
МАМУЗІЧ Ілля
(*д-р техн. наук, проф., Загреб, Хорватія*);
МИГУЩЕНКО Руслан Павлович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
МОХАММЕД Амін Саліх
(*д-р наук, доц., 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 Балаї Баласубраманіан
(*PhD, доц., Ербіль, Ірак*);
СЕРКОВ Олександр Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
СМІРНОВ Олексій Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Кропивницький, Україна*);
СТАНКУНАС Йонас
(*д-р техн. наук, проф., Вільнюс, Литва*);
СТЕЦЬКО Юрій
(*канд. фіз.-мат. наук, Тампа, Флоріда, США*);
СУЧКОВ Григорій Михайлович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
УШЕНКО Юрій Олександрович
(*д-р фіз.-мат. наук, проф., Чернівці, Україна*);
ФІЛАТОВА Ганна Євгенівна
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ХАРЧЕНКО Вячеслав Сергійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ШВАЧИЧ Геннадій Григорович
(*д-р техн. наук, проф., Дніпро, Україна*);
ШИШАЦЬКИЙ Андрій Володимирович
(*канд. техн. наук, Київ, Україна*);

Відповідальний секретар:

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:

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

Editorial board members:

Azad Agalar oğlu BAYRAMOV
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Baku, Azerbaijan*);
Nathan BLAUNSTEIN
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Beer Sheva, Israel*);
Sergiy GNATYUK
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Kyiv, Ukraine*);
Elena ZAITSEVA
(*Dr. (Comp. Eng.), Prof., Zilina, Slovakia*);
Mikolay KARPINSKI
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Bielsko-Biala, Poland*);
Andrii KOVALENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Pavlo KOSTENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Heorhii KUCHUK
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Vasyl LYTVYN
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Lviv, Ukraine*);
Volodymyr LUKIN
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Ilya MAMUZIĆ
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Zagreb, Croatia*);
Ruslan MYGUSHCHENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Amin Salih MOHAMMED
(*Dr. (Comp. Eng.), Ass. Prof., Erbil, Iraq*);
Serhii OSTAPOV
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Chernivtsi, Ukraine*);
Anatoliy POVOROZNYUK
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Lev RASKIN
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Balasubramanian Balaji SARAVANA
(*PhD (Comp. Eng.), Ass. Prof., Erbil, Iraq*);
Aleksandr SERKOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Alexey SMIRNOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kropyvnytskyi, Ukraine*);
Jonas STONKUNAS
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Vilnius, Lithuania*);
Yuri STETSKO
(*PhD (Ph-Math.), Tampa, Florida, USA*);
Hryhorii SUCHKOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Yuri USHENKO
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Chernivtsi, Ukraine*);
Hanna FILATOVA
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Viacheslav KHARCHENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Hennadii SHVACHICH
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Dnipro, Ukraine*);
Andrii SHYSHATSKYI
(*PhD (Tech.), Kyiv, Ukraine*).

Responsible secretary:

Andrii 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

<i>Гороховатський В. О., Гадецька С. В., Жадан О. В., Хвостенко О. В.</i> Дослідження результативності класифікаторів зображень за статистичними розподілами для компонентів структурного опису	5
--	---

МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

<i>Можася М. О., Буслов П. В.</i> Метод моделювання соціального профілю з використанням оптимізації перетворення структур Big Data (eng.)	12
<i>Сальник Ю. П., Волощій Б. Ю.</i> Стохастична модель функціональної поведінки охоронної системи об'єкта критичної інфраструктури ..	18
<i>Ходаковський О. В., Левченко Л. О., Колумбет В. П., Козачук А. Д., Кузавський Д. С.</i> Розрахунковий апарат моделювання поширення електромагнітних полів різномірних джерел	34

МЕТОДИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ

<i>Бутко І. М.</i> Використання геопросторової інформації органами державної влади для підтримки прийняття управлінських рішень (eng.)	39
<i>Тверитникова О. Є., Демідова Ю. Є., Дроздова Т. В.</i> Система менеджменту безпеки професійної діяльності на підприємствах України: міжнародний та європейський вимір (eng.)	45

МЕТОДИ СИНТЕЗУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

<i>Іохов О. Ю., Малюк В. Г., Сальников О. М., Новикова О. О.</i> Застосування онтології задачі вибору для опису процесів взаємодії суб'єктів управління	54
<i>Раскін Л. Г., Сіра О. В., Парфенюк Ю. Л.</i> Вибір оптимального маршруту у розподіленій транспортній мережі в умовах невизначеності (eng.) ...	62

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

<i>Барковська О. Ю., Холєв В. О., Пивоварова Д. І., Іващенко Г. С., Росінський Д. М.</i> Система обміну знаннями молодих науковців із різних країн (eng.)	69
<i>Кобзєв А. В., Мурзін М. В.</i> Показники точності визначення координат джерел радіовипромінювання у пеленгаторній мережі HF діапазону	75
<i>Ковальчук А. О., Олещук М. М., Карлов В. Д., Карпенко О. В., Бєсова О. В., Лукашук О. В.</i> Аналіз чутливості систем супроводження цілей з фіксованими параметрами багатоканальної РЛС до характеристик зовнішніх впливів (eng.)	82

TABLE OF CONTENTS

PROBLEMS OF IDENTIFICATION IN INFORMATION SYSTEMS

<i>Volodymyr Gorokhovatskyi, Svitlana Gadetska, Oleksii Zhadan, Oleksandr Khvostenko</i> Study of the effectiveness of image classifiers by statistical distributions for components of structural description (ukr.)	5
--	---

INFORMATION SYSTEMS MODELING

<i>Mykhailo Mozhaiev, Pavlo Buslov</i> Method of modeling of a social profile using big data structure transformation optimization	12
<i>Yurii Salnyk, Bohdan Volochiy</i> A stochastic model of the security system's functional behavior for a critical infrastructure object (ukr.)	18
<i>Oleksii Khodakovskiy, Larysa Levchenko, Vadym Kolumbet, Anna Kozachuk, Dmytro Kuzhavskiy</i> Calculation apparatus for modeling the distribution of electromagnetic fields of different sources (ukr.)	34

ADAPTIVE CONTROL METHODS

<i>Ihor Butko</i> The use of geospatial information by public authorities to support the decision making of management	39
<i>Elena Tverytnykova, Yulia Demidova, Tatyana Drozdova</i> Management system of occupational safety at Ukrainian enterprises: international and European dimension	45

METHODS OF INFORMATION SYSTEMS SYNTHESIS

<i>Olexandr Iohov, Victor Maliuk, Olexandr Salnikov, Olena Novyкова</i> Application of the ontology of the choice problem to describe the processes of management subject interaction (ukr.)	54
<i>Lev Raskin, Oksana Sira, Yurii Parfeniuk</i> Selection of the optimum route in an extended transportation network under uncertainty	62

INFORMATION SYSTEMS RESEARCH

<i>Olesia Barkovska, Vladyslav Kholiev, Daria Pyvovarova, Heorhii Ivashchenko, Dmytro Rosinskiy</i> International system of knowledge exchange for young scientists	69
<i>Anatolij Kobziev, Mykhailo Murzin</i> Indicators of accuracy for determining the coordinates of radio emission sources in the short wave direction finding network (ukr.)	75
<i>Andrii Kovalchuk, Mykola Oleshchuk, Volodymyr Karlov, Oleh Karpenko, Oksana Biesova, Olena Lukashuk</i> Analysis of sensitivity of target tracking systems to external interference in multichannel radars with fixed parameters	82

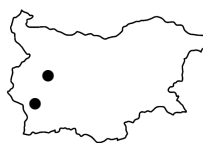
Семенов С. Г., Давидов В. В., Гребенюк Д. С. Дослідження моделі та вимог до безпеки програмного забезпечення (eng.) 87	Serhii Semenov, Viacheslav Davydov, Daryna Hrebeniuk Research of the software security model and requirements 87
Тимочко О. І., Ларін В. В., Колмиков М. М., Тимочко О. О., Павленко В. М. Дослідження методів фільтрації зображень в комп'ютерних системах (eng.) 93	Oleksandr I. Tymochko, Volodymyr Larin, Maksym Kolmykov, Oleksander O. Tymochko, Vladislava Pavlenko Research of images filtration methods in computer systems 93
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ	INTELLIGENT INFORMATION SYSTEMS
Казмірчук А. В., Жданова О. Г., Попенко В. Д., Сперкач М. О. Розв'язання багатокритеріальної задачі складання розкладу з використанням генетичного алгоритму 100	Alina Kazmirschuk, Olena Zhdanova, Volodymyr Popenko, Maiia Sperkach Solving a multicriteria scheduling problem using a genetic algorithm (ukr.) 100
Чалий С. Ф., Лециньський В. А. Побудова патернів динаміки вподобань користувачів для пояснень в рекомендаційній системі (eng.) 107	Serhii Chalyi, Volodymyr Leshchynskyi Construction of patterns of user preferences dynamics for explanations in the recommender system 107
МЕТОДИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ	METHODS OF INFORMATION SYSTEMS PROTECTION
Рубан І. В., Бологова Н. М., Мартовицький В. О., Концев О. О. Модель аутентифікації цифрових зображень (eng.) 113	Igor Ruban, Nataliia Bolohova, Vitalii Martovytskyi, Oleh Koptsev Digital image authentication model 113
Чернева Г. П., Халімов П. В. Мутаційне тестування політик керування доступом (eng.) 118	Galina Cherneva, Pavlo Khalimov Mutation testing of access control policies 118
ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ	APPLIED PROBLEMS OF INFORMATION SYSTEMS OPERATION
Краснобаєв В. А., Кошман С. О., Ковальчук Д. М. Метод діагностики даних у системі залишкових класів (eng.) 123	Victor Krasnobayev, Sergey Koshman, Dmytro Kovalchuk The data diagnostic method of in the system of residue classes 123
Макогон О. А., Сучко Р. І., Москаленко І. В., Калінін І. В., Бурдін С. В., Іксариця В. В. Застосування математичного апарату кореляційного аналізу для визначення обсягу мінімального діагностування при динамічному моніторингу технічного стану свинцево-кислотних аккумуляторних батарей (eng.) 129	Helen Makogon, Roman Suchko, Viktor Moskalenko, Igor Kalinin, Sergiy Burdin, Viktoriia Iksarytsia Application of the correlation analysis mathematical apparatus for determination the lead-acid batteries management and status control minimum diagnosis 129
Сабзієв Е. Н. Визначення місця розташування безпілотної літальної апарату на основі зображень відеокамер (eng.) 136	Elkhan Sabziev Determining the location of an unmanned aerial vehicle based on video camera images 136
Сакович Л. М., Криховецький Г. Я., Мирошніченко Ю. В., Ігнатенко І. Г. Діагностування вторинних джерел електроживлення засобів зв'язку 140	Lev Sakovych, Heorhii Krykhovetskyi, Iurii Myroshnychenko, Ivan Ihnatenko Diagnostics of secondary power supplies means of communication (ukr.) 140
Алфавітний показник 146	Alphabetical index 146

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

Географія статей цього номера



Азербайджан
Azerbaijan



Болгарія
Bulgaria



Германія
Germany



Україна
Ukraine

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Барковська О. Ю. (Olesia Barkovska)	69	Лещинський В. О. (Volodymyr Leshchynskyi)	107
Бєсова О. В. (Oksana Biesova)	82	Лукашук О. В. (Olena Lukashuk)	82
Бологова Н. М. (Natalia Bolohova)	113	Макогон О. А. (Helen Makogon)	129
Бурдін С. В. (Sergiy Burdin)	129	Малюк В. Г. (Victor Maliuk)	54
Буслов П. В. (Pavlo Buslov)	12	Мартовицький В. О. (Vitalii Martovytskyi)	113
Бутко І. М. (Ihor Butko)	39	Мирошніченко Ю. В. (Iurii Myroshnychenko)	140
Волочий Б. Ю. (Bohdan Volochiy)	18	Можаєв М. О. (Mykhailo Mozhaiev)	12
Гадецька С. В. (Svitlana Gadetska)	5	Москаленко І. В. (Viktor Moskalenko)	129
Гороховатський В. О. (Volodymyr Gorokhovatskyi)	5	Мурзін М. В. (Mykhailo Murzin)	75
Гребенюк Д. С. (Daryna Hrebeniuk)	87	Новикова О. О. (Olena Novykova)	54
Давидов В. В. (Viacheslav Davydov)	87	Олещук М. М. (Mykola Oleshchuk)	82
Демідова Ю. Є. (Yulia Demidova)	45	Павленко В. М. (Vladislava Pavlenko)	93
Дроздова Т. В. (Tatyana Drozdova)	45	Парфенюк Ю. Л. (Yurii Parfeniuk)	62
Жадан О. В. (Oleksii Zhadan)	5	Пивоварова Д. І. (Daria Pyvovarova)	69
Жданова О. Г. (Olena Zhdanova)	100	Попенко В. Д. (Volodymyr Popenko)	100
Іващенко Г. С. (Heorhii Ivashchenko)	69	Раскін Л. Г. (Lev Raskin)	62
Ігнатенко І. Г. (Ivan Ihnatenko)	140	Росінський Д. М. (Dmytro Rosinskiy)	69
Іксариця В. В. (Viktorii Iksarytsia)	129	Рубан І. В. (Igor Ruban)	113
Іохов О. Ю. (Olexandr Iohov)	54	Сабзієв Е. Н. (Elkhan Sabziev)	136
Казмірчук А. В. (Alina Kazmirchuk)	100	Сакович Л. М. (Lev Sakovych)	140
Калінін І. В. (Igor Kalinin)	129	Сальник Ю. П. (Yurii Salnyk)	18
Карлов В. Д. (Volodymyr Karlov)	82	Сальніков О. М. (Olexandr Salnikov)	54
Карпенко О. В. (Oleh Karpenko)	82	Семенов С. Г. (Serhii Semenov)	87
Кобзєв А. В. (Anatolij Kobziev)	75	Сіра О. В. (Oksana Sira)	62
Ковальчук А. О. (Andrii Kovalchuk)	82	Сперкач М. О. (Maiia Sperkach)	100
Ковальчук Д. М. (Dmytro Kovalchuk)	123	Сучко Р. І. (Roman Suchko)	129
Козачук А. Д. (Anna Kozachuk)	34	Тверитникова О. Є. (Elena Tverytnykova)	45
Колмиков М. М. (Maksym Kolmykov)	93	Тимочко О. І. (Oleksandr I. Tymochko)	93
Колумбет В. П. (Vadym Kolumbet)	34	Тимочко О. О. (Oleksander O. Timochko)	93
Копцев О. О. (Oleh Koptsev)	113	Халімов П. В. (Pavlo Khalimov)	118
Кошман С. О. (Sergey Koshman)	123	Хвостенко О. В. (Oleksandr Khvostenko)	5
Краснобаєв В. А. (Victor Krasnobayev)	123	Ходаковський О. В. (Oleksii Khodakovskiy)	34
Криховецький Г. Я. (Heorhii Krykhovetskyi)	140	Холєв В. О. (Vladyslav Kholiev)	69
Кужавський Д. С. (Dmytro Kuzhavskiy)	34	Чалий С. Ф. (Serhii Chalyi)	107
Ларін В. В. (Volodymyr Larin)	93	Чернева Г. П. (Galina Cherneva)	118
Левченко Л. О. (Larysa Levchenko)	34		

Наукове видання

Сучасні
інформаційні системиAdvanced
Information SystemsНауковий журнал
Том 5, № 1Відповідальний за випуск *С. Г. Семенов*
Технічний редактор *Д. С. Гребенюк*
Комп'ютерна верстка *Н. Г. Кучук*

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

Підписано до друку 2.03.2021 Формат 60×84/8. Ум.-друку. арк. 18,25. Тираж 120 прим. Зам. 302-21

Адреса редакції: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"
Кафедра ОТП, вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків, Україна, тел. +38(057)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 932.2:004.93'1

doi: 10.20998/2522-9052.2021.1.01

В. О. Гороховатський¹, С. В. Гадецька², О. В. Жадан¹, О. В. Хвостенко¹¹Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТІ КЛАСИФІКАТОРІВ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА СТАТИСТИЧНИМИ РОЗПОДІЛАМИ ДЛЯ КОМПОНЕНТІВ СТРУКТУРНОГО ОПИСУ

Анотація. Предметом досліджень є моделі для побудови класифікаторів зображень у просторі описів як множини дескрипторів ключових точок при розпізнаванні візуальних об'єктів у системах комп'ютерного зору. **Метою** є створення та вивчення властивостей класифікатора зображень на підґрунті побудови ансамблю розподілів для компонентів структурного опису із використанням різноманітних моделей прийняття класифікаційних рішень, що забезпечує результативну класифікацію. **Завдання:** побудова моделей класифікації у синтезованому просторі образів ймовірнісних розподілів, аналіз параметрів, що впливають на їх ефективність, експериментальне оцінювання результативності класифікаторів засобами програмного моделювання за наслідками оброблення експериментальної бази зображень. Застосованими **методами** є: детектор ORB для формування дескрипторів ключових точок, інтелектуальний аналіз даних, математична статистика, засоби визначення релевантності для множин векторів даних, програмне моделювання. Отримані **результати:** Розроблений метод класифікації підтверджує свою працездатність та ефективність для класифікації зображень. Результативність методу може бути посилена введенням різноманіття видів метрик та мір подібності між центрами та дескрипторами, вибором способу формування центрів для еталонних описів, введенням логічного оброблення та стиснення структурного опису. Найкращі результати класифікації показала модель з використанням найбільш вагомому класу за вектором розподілів для кожного дескриптора, що відповідає параметру моди. Використання концентрованої частки даних опису дає можливість покращити його розрізнення з іншими описами. Застосування медіани як центру опису має перевагу над середнім значенням. **Висновки.** Наукова новизна – розроблення ефективного методу класифікації зображень на основі впровадження системи ймовірнісних розподілів для компонентів даних, що сприяє поглибленому аналізу у просторі даних та підвищує результативність класифікації. Класифікатор реалізовано у варіантах зіставлення інтегрального подання розподілів за класами і на підставі аналізу моди для розподілів окремих компонент. **Практична значущість** роботи – побудова моделей класифікації у видозміненному просторі даних, підтвердження працездатності запропонованих модифікацій аналізу даних на прикладах зображень, розроблення програмних моделей для впровадження запропонованих методів класифікації у системах комп'ютерного зору.

Ключові слова: комп'ютерний зір; класифікація зображень; ключова точка; детектор ORB; дескриптор; центр опису; статистичний розподіл; релевантність описів; результативність класифікації.

Вступ

Впровадження статистичних методів як апарату інтелектуального аналізу даних з метою побудови класифікаторів для образів візуальних об'єктів у системах комп'ютерного зору націлене на забезпечення результативності вирішення прикладних задач на підставі вивчення змісту, структури еталонних даних та впровадження цих знань у процес класифікації [1-5]. Елементом простору образів при впровадженні структурних методів розпізнавання у середовищі векторних даних є скінченна множина дескрипторів ключових точок (КТ) зображення [4, 11].

Статистичні розподіли останнього часу стали першорядним засобом аналізу даних у системах розпізнавання образів [1, 2]. Якщо опис розпізнаваного об'єкту подано множиною векторів, статистичний апарат стає ключовим способом прийняття рішення про клас візуального об'єкту. Ймовірнісні розподіли даних описів у складі системи блоків для дескрипторів КТ показали свою

високу результативність у аспекті якості класифікації та швидкодії оброблення.

Виникає нагальна необхідність впровадження апарату розподілів у загальному виді для системи багатовимірних дескрипторів опису за встановленими класами даних, що визначаються заданою базою еталонів [3, 6, 8].

Навчання класифікатора в межах фіксованої бази зображень еталонів виступає у процесі класифікації як спосіб передачі інформації від нижніх рівнів ієрархії даних (описи еталонів як множина дескрипторів КТ) до верхніх (класифікація), що здатні узагальнювати знання нижніх рівнів [3, 9, 19-21].

Метою статті є створення та вивчення властивостей класифікатора зображень на підґрунті побудови ансамблю розподілів для компонентів структурного опису з використанням різноманітних моделей прийняття класифікаційних рішень, що забезпечує результативну класифікацію за множиною дескрипторів ключових точок.

Завдання роботи – побудова моделей класифікації у новоствореному просторі образів, аналіз параметрів, що впливають на їх ефективність, експериментальне оцінювання результативності класифікаторів засобами програмного моделювання.

Формалізація задачі класифікації

Розглянемо багатовимірний простір B^n усяких бінарних векторів розмірністю n , де будемо конструювати образи об'єкту і еталонів. Зафіксуємо мультимножину векторів $E_i \subseteq B^n$ як опис візуального об'єкту (зображення) у просторі множин дескрипторів КТ, $E_i = \{e_v(i)\}_{v=1}^s$, $s = \text{card } E_i$ – число дескрипторів у множині [1, 4]. Ознаки – це вектори $e_k \in B^n$, скінченна множина яких створює опис об'єкту.

Задамо $\forall(e_k, e_\tau), e_k \in B^n, e_\tau \in B^n$ відстань $\rho: B^n \times B^n \rightarrow [0, \infty]$ у векторному просторі B^n . Прикладом є Хемінгова метрика, для бінарних даних діапазон значень цієї метрики фіксований – $[0, n]$. Відстань є фундаментальним критерієм еквівалентності на множині $\{e_k\}$, так як віддзеркалює візуальну схожість піксельних околів КТ для функції яскравості зображення, яку відображає дескриптор. Еквівалентність $e_k \sqsubseteq e_\tau$ для дескрипторів e_k, e_τ визначаємо на підставі порогу δ_ρ для величини метрики: $e_k \sqsubseteq e_\tau : \rho(e_k, e_\tau) \leq \delta_\rho$.

Класифікація передбачає наявність деякої бази E описів еталонних зображень розмірністю $N: E = \{E_1, E_2, \dots, E_N\}$. Кожен еталонний опис E_i репрезентує для класифікатора окремий клас та має вид скінченної множини дескрипторів КТ із B^n .

Задачею дослідження є побудова класифікатора $K: B^n \rightarrow [1, 2, \dots, N]$ на основі конструювання ймовірнісної системи ознак за результатом навчання на матеріалі бази еталонів $E = \{E_1, E_2, \dots, E_N\}$ [1, 21].

Провідна ідея побудови класифікатора: для кожного дескриптора об'єкту чи еталонів встановити ступінь належності до встановлених класів у вигляді статистичного розподілу, а потім на підставі сформованої системи компонентних розподілів побудувати інтегровану ансамблеву міру релевантності щодо опису аналізованого об'єкту, а далі застосувати її у класифікаторі шляхом оптимізації значення релевантності у системі класів.

На підставі наявної бази описів еталонів шляхом навчання створюємо новий простір образів компонентних даних класифікації у складі значень їх ймовірнісної міри належності до класів. Впровадження такого підходу із використанням рішень ансамблю компонентів забезпечує універсальність і вагому результативність класифікації.

Побудова ансамблю розподілів для компонентів

Трансформуємо опис еталону $E_i = \{e_v(i)\}_{v=1}^s$ із бази E у n -мірному векторному просторі у деякий «центр опису» – агрегований вектор (i – номер еталону) [4, 11] $\alpha(i) = (\alpha_1(i), \alpha_2(i), \dots, \alpha_n(i))$, який обчислюємо на підставі множини E_i . Центр опису α можна визначити, наприклад, шляхом обчислення середнього значення чи медіани для фіксованої множини векторів [3, 18].

Обчислимо вектори $\alpha(i)$ як статистичні характеристики для кожного із еталонів і покладемо їх в підґрунтя класифікації.

Окремий вектор $e_v(i) \in E_i$ еталону, як і будь-який дескриптор об'єкту, можна формально розглядати як елемент ансамблю n -компонентних векторів

$$e_v(i) = (e_{v,1}(i), e_{v,2}(i), \dots, e_{v,n}(i)). \quad (1)$$

Розглянемо спектр аналізованих даних у аспекті віднесення складового елементу опису до системи еталонних класів на підставі визначення деякої функції належності зі значеннями із діапазону $0 \dots 1$ [5, 6, 10]:

$$\mu: B^n \rightarrow [0, 1], \mu(e_v(i)) \in [0, 1], \quad (2)$$

аргументами функції μ є дескриптор опису і номер класу.

Функцію належності μ визначимо на підставі основоположної характеристики у data science – співвідношення значень мір, що виражають число сприятливих випадків (подібності до конкретного класу) та загального числа N випадків (сума подібностей до усіх класів) [3, 6, 7]:

$$\mu(e_v(i)) = \eta(e_v, i) / \sum_{i=1}^N \eta(e_v, i). \quad (3)$$

Загальне число випадків задається кількістю N класів. Міра подібності $\eta(e_v, i)$ елемента до класу може бути задана через відстань ρ у векторному просторі до центра класу, наприклад, через манхетенську метрику

$$\rho(e_v, i) = \sum_{k=1}^n |e_{v,k}(i) - \alpha_k(i)|. \quad (4)$$

Для випадку, якщо $\alpha(i) \in B^n, e_v(i) \in B^n$ замість (4) можна застосувати відстань $\chi(e_v, i)$ Хемінга (число не співпадаючих бітів) у просторі B^n , тоді подібність $\eta(e_v, i)$ буде визначена як $\eta(e_v, i) = n - \chi(e_v, i)$.

Для кожного елемента $e_v(i)$ за виразом (3) обчислимо значення вектора d його статистичного розподілу за множиною N класів

$$d = (d(1), d(2), \dots, d(N)),$$

$$d(i) = \mu(e_v(i)), \sum_{i=1}^N d(i) = 1. \quad (5)$$

Зі статистичної точки зору вектор d для довільного дескриптору еталону (об'єкту) виражає ступінь близькості дескриптора до класу.

Будемо розглядати матрицю

$$D = \{ \{d_k(i)\}_{k=1}^s \}_{i=1}^N,$$

що аналогічно нечіткому поданню задає значення міри належності (3) для всіх компонентів аналізованого опису. Фактично D визначає розподіл сукупностей даних за визначеними апіорі класами.

Значення матриці D дають можливість запровадити логічне оброблення вхідних даних на предмет видалення можливих завад (тобто хибних дескрипторів) шляхом аналізу значень відстаней (4) чи значень (5) з використанням порогу. У той же час цей аналіз може бути безпосередньо впроваджено на етапі класифікації.

Моделі класифікатора

На основі матриці D побудуємо класифікатор K , який для структурного опису довільного об'єкта реалізує відображення

$$K : D \rightarrow [1, 2, \dots, N]$$

із множини розподілів компонентів даних у множині класів.

На першому етапі збудуємо розподіли (5) за класами даних для множини еталонів бази. Зрозуміло, що для кожного представника $E_i \in E$ класифікатор K повинен отримати номер відповідного еталону, опис якого поступає на вхід класифікатора. Це є першочерговим принципом адекватності функціонування класифікатора, який повинен впевнено розрізняти описи із множини еталонів. Наприклад, у розподілі даних для 1-го еталону (1-й стовпець матриці D) перша компонента повинна домінувати над іншими. Аналогічно для 2-го еталону домінуючим елементом розподілу повинен бути 2-й і т.д.

Розглянемо способи побудови класифікатора.

1. Визначення стовпця матриці D з максимальною сумою елементів

$$K : j = \arg \max_i \sum_{v=1}^s d_v(i), \quad (6)$$

що встановлює клас j об'єкту через агрегацію розподілів кожного із класів (окремий стовпець) за всією множиною складових опису. Класифікація (6) відповідає найбільш правдоподібному рішення, так як побудована на додаванні значень однотипних розподілів [1, 2, 8, 9].

2. Обчислення максимального значення для кожного рядка матриці D

$$c_v = \arg \max_{i=1, \dots, N} \{d_v(i)\}, \quad (7)$$

тобто шляхом визначення для кожного дескриптора опису найбільш вагомий клас за вектором розподілів, що відповідає параметру моди [2, 10,

12]. За результатом (7) для всієї множини дескрипторів опису отримуємо вектор голосів

$$h = (h_1, h_2, \dots, h_N), h_b = \sum_{v=1}^s c_v, b = \overline{1, N}, \quad (8)$$

на підставі якого визначимо номер класу

$$r = \arg \max_b h_b, \quad (9)$$

що набрав максимальне значення серед голосів дескрипторів об'єкту. Це метод голосування на множині дескрипторів, де клас визначається на підґрунті моди розподілу [8, 17].

Розглянуті варіанти (6)-(9) побудови класифікатора природно можна трактувати в рамках теорії ансамблевих моделей [8-14], де за рахунок створення та агрегування відгуків компонентних класифікаторів (локальних рішень) синтезується «сильний» класифікатор із гарантовано вищою результативністю прийняття рішень. Найбільше розглянуті підходи відповідають моделі бустінгу [7, 13].

За результатами досліджень ансамбль класифікаторів у більшості випадків забезпечує кращу точність аналізу даних чи навчання, однак, викликає необхідність вирішування ряду проблем, таких як суттєве збільшення часових та обчислювальних витрат, складність інтерпретації результатів, обґрунтування та вибір способів комбінування локальних рішень [1, 7, 11, 13]. У нашому випадку гурт локальних класифікаторів складається із базових моделей одного типу, тобто є однорідним. Загалом ансамблеве класифікаційне рішення Θ можна подати у виді комбінування скінченної множини локальних рішень θ_v

$$K : j = \arg \max_i \Theta \{ \{ \theta_v(d_v(i)) \}_{v=1}^s \}. \quad (10)$$

Зазначимо, що у ансамблевих моделях аналізу зображень з метою врахування тільки значимих локальних рішень часто застосовують систему параметрів порогів [1-4, 8], яка забезпечує відділення завад і загалом підвищує надійність. Наприклад, у модифікації класифікатора (7)-(9) клас

$$d_m = \max_{i=1, \dots, N} \{d_v(i)\}$$

для локального рішення визначається тільки у випадку, якщо виконується умова, що порівнює значення оптимуму d_m з порогом δ_d або з найближчим до нього локальним оптимумом d_{m-1} (λ – числовий коефіцієнт):

$$d_m > \delta_d, \text{ або } d_m > \lambda d_{m-1}. \quad (11)$$

Зауважимо, що поріг δ_d можна встановити за результатами навчання із вчителем на множині дескрипторів для еталонів, тобто результативне значення моди має бути не меншим від його значення для «свого» еталону. Цей аналіз на етапі навчання класифікатора треба проробити для усіх

еталонів і у якості порогу δ_d обрати серед усіх отриманих мод найбільше [18, 21].

Один із засобів підвищення результативності ансамблевих методів класифікації шляхом адаптації до наявних даних полягає в тому, щоб на підставі введення логічних процедур відібрати деяку концентровану (або найбільш інформативну) підмножину елементів, які стануть підґрунтям для класифікаційного рішення [11, 18]. Стосовно опису як множини дескрипторів КТ така процедура може полягати у відборі підмножини елементів, що знаходяться в межах заданої відстані від центру, або фіксованого числа елементів, найближчих до центру опису. Нехай $Z \subset B^n$ – опис, $s = \text{card } Z$ – його потужність, тоді введемо процедуру

$$\begin{aligned} L(Z) \rightarrow Z^*, Z^* \subset B^n, \\ \text{card } Z^* = s^*, s^* < s. \end{aligned} \quad (12)$$

Застосування (12) не тільки значно скорочує час обчислень але й часто сприяє покращенню показників класифікації [18]. Процедура L реалізується на етапі попереднього оброблення, тому на час здійснення класифікації не впливає.

Результати комп'ютерного моделювання

Моделювання виконано у середовищі PyCharm 2020 із використанням засобів бібліотеки Open CV та мови програмування Python [5, 11, 15]. Для визначення дескрипторів КТ застосовано детектор ключових точок ORB [4, 15] розмірністю $n=256$. Розроблені моделі класифікатора вжито на прикладі

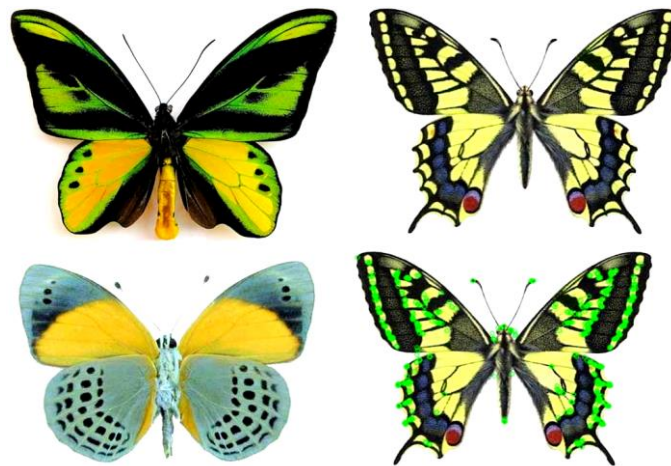


Рис. 1. Еталонні зображення метеликів Химера, Махаон, Давісій та виділені координати КТ
(Fig. 1. Reference images of butterflies Chimera, Mahaon, Davisi and selected key points coordinates)

У відповідності до моделі класифікації (6) отримано значення векторів сум у виразі (6), які склали відповідно: для 1-го еталону (173,01; 165,44; 161,51), для 2-го еталону (165,45; 170,94; 163,65), для 3-го еталону (164, 97; 163,69; 171,18). Бачимо, що еталони за методом (6) класифікуються вірно (максимум спостерігається у відповідній компоненті), але різниця між максимумом інтегрованого розподілу і найближчим до нього значенням досить незначна (у межах 3,5-4,5%). Це

зображень метеликів із бази даних Leeds Butterfly [16, 17]. Розмір зображень склав 600x600 пікселів. Ілюстрація класів еталонних зображень та сформовані координати КТ показані на рис. 1. Кількість обчислених дескрипторів у описі кожного із еталонів складає $s=500$.

Шляхом підрахунку числа одиничних бітів у кожному розряді опису еталонів отримано вектори $\alpha(i)$, $i=1,2,3$, які логічним обробленням приведено до бінарного виду задля подальшого застосування метрики Хемінга. У цьому випадку центри $\alpha(i)$ фактично визначались за усередненням значень дескрипторів опису. Обчислені значення відстаней між центрами еталонів склали 56, 72, 72, що говорить про суттєву їх близькість у даному аспекті (28% від максимальної відстані), так як загалом значення відстані Хемінга для аналізованих даних належать діапазону 0,...,256.

вказує на суттєву схожість образів у сформованому просторі ознак із використанням моделі (6).

За другою моделлю класифікатора (7)-(9) отримано трійки накопичених голосів (h_1, h_2, h_3) дескрипторів для кожного із еталонів: (281, 111, 108), (144, 249, 107), (140, 86, 274). Із отриманих числових значень бачимо, що цей класифікатор впевнено здійснює розпізнавання зображень за множиною КТ, так як різниця між максимумом голосів та його найближчим конкурентом

перевищує 42%, а для окремих еталонів (1 та 2) досягає 60%. Це вказує на вагому перспективу застосування таких моделей класифікації у порівнянні з моделлю інтегрального аналізу (6).

Наші експерименти показали, що запропонована процедура аналізу даних цілком залежить від способу формування центрів $\alpha(i)$. Окреме дослідження проведено для визначення центрів за значенням медіани для множини детекторів опису [11, 12]. Отримано, що відстань між медіанами різних еталонів коливається в більшому діапазоні, ніж відстань між центрами-середніми значеннями. У нашому експерименті спостерігалось відхилення від максимальної відстані для медіан еталонів 16%...46%. Медіани виявилися більш чутливими до змісту опису, що сприяє якості класифікації.

Проведені експерименти з метою відбору ансамблю дескрипторів опису, найближчих до сформованого центру (медіани чи середнього) з використанням моделі логічного оброблення (12) [11]. Такий спосіб суттєво скорочує час оброблення. Отримані модифіковані описи еталонів шляхом відбору 100 та 200 дескрипторів із загальної кількості 500.

Дослідження показало, що для запропонованої модифікації усі еталонні описи класифікуються вірно, а вагові показники класів для зображень еталонів певною мірою покращуються зі зниженням числа компонентів.

Зі зменшенням числа дескрипторів в описі спостерігається відповідна концентрація значень розподілів навколо центрів, що виливається у збільшення показників, що відповідають «правильному» класу. А це, в свою чергу, сприяє підвищенню результативності класифікації, так як клас об'єкта визначається більш впевнено. Різниця між максимальним значенням розподілу та найближчим до нього за величиною збільшилась для різних еталонів від 3% для повного опису до 15% (200 дескрипторів) і 21% (100 дескрипторів) для модифікованого. Подальше стиснення опису за моделлю (12) призводить до втрати інформативності складу аналізованих даних. Зауважимо, що

розглянутий спосіб стиснення множини дескрипторів не змінює значення медіани як центру опису.

Висновки

Розроблений метод класифікації підтверджує свою працездатність та ефективність при класифікації зображень. Його результативність для об'ємних баз зображень може бути посилена введенням інших видів метрик та мір подібності, вибором способу формування центрів для еталонних описів, введенням логічного оброблення та стиснення структурного опису. Найкращі результати класифікації показала модель із використанням найбільш вагомому класу за вектором розподілів для кожного дескриптора, що відповідає параметру моди. Використання концентрованої частки даних опису дає можливість покращити його розрізнення з іншими описами.

Наукову новизну дослідження складає розроблення ефективного методу класифікації зображень на основі впровадження системи ймовірнісних розподілів для компонентів даних, що сприяє поглибленому аналізу у просторі даних та підвищує результативність класифікації. Класифікатор реалізовано у варіантах зіставлення інтегрального подання розподілів за класами і на підставі аналізу моди для розподілів окремих компонент. Застосування медіани як центру опису має перевагу над середнім значенням.

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

Перспектива дослідження може бути пов'язана із вивченням завадостійкості розроблених методів та оцінювання їх прикладної результативності стосовно об'ємних колекцій зображень, де коефіцієнти розподілів можуть приймати невеликі значення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гороховатський В.О., Гадецька С.В. Статистичне оброблення та аналіз даних у структурних методах класифікації зображень (монографія). Харків : ФОП Панов А.Н., 2020. 128 с. DOI: <https://doi.org/10.30837/978-617-7859-69-6>.
2. Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G. Pattern classification. 2ed. Wiley. 2000. 738 p.
3. Флаха П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. Москва: ДМК Пресс, 2015. 400 с.
4. Гороховатський В.О., Пупченко Д.В., Солодченко К.Г. Аналіз властивостей, характеристик та результатів застосування новітніх детекторів для визначення особливих точок зображення. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2018. № 1 (47). С. 93–98.
5. Tvoroshenko I.S., Gorokhovatsky V.O. Intelligent Classification of Biophysical System States using Fuzzy Interval Logic. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2019. Vol. 78 (14). P. 1303-1315. DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i14.80>.
6. Kim S., Kweon I.-S. Biologically motivated perceptual feature: Generalized robust invariant feature. *Asian Conf. of Comp. Vision (ACCV-06)*. 2006. P. 305-314
7. Nong Ye. Data Mining: Theories, Algorithms, and Examples (1st. ed.). CRC Press, Inc., USA – 2013.
8. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications, London: Springer, 2010. 979 p.

9. 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*. P. 593-597. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>.
10. Porter F.C. Testing Consistency of Two Histograms. ArXiv e-prints. 2008. P. 1-35.
11. Гороховатський, В.О., Пономаренко, Р.П. Класифікація зображень на підставі формування незалежної системи кластерів у складі структурних описів бази еталонів. *Сучасні інформаційні системи*, 2020. Vol. 4, № 2. С. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.04>.
12. Kohonen, T. *Self-Organizing Maps*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2001. DOI: <https://doi.org/10.5555/558021>.
13. Паклин Н.Б., Орешков В.И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям: учеб. пособ. СПб.: Питер, 2013, 704 с.
14. Гороховатський В.А., Пуятин Е.П., Столяров В.С. Исследование результативности структурных методов классификации изображений с применением кластерной модели данных. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. 2017. №3 (42). С. 78-85.
15. (2020), ORB feature detector and binary descriptor, URL: https://scikit-image.org/docs/dev/auto_examples/features_detection/plot_orb.html.
16. Wang J; Markert K.; Everingham M. Learning Models for Object Recognition from Natural Language Descriptions. *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC-2009)*. London, UK, 7-10 September 2009. P. 1-11.
17. Josiah Wang, Katja Markert, Mark Everingham. Learning Models for Object Recognition from Natural Language Descriptions. 2013. URL: <http://www.josiahwang.com/projects/leedsbutterfly>.
18. Гороховатський В.О., Гадецька С.В., Пономаренко Р.П. Логічний аналіз та оброблення даних задля класифікації зображень на підставі формування статистичного центру опису. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 4(56). С. 43-48. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.4.043>.
19. Celik C., Sakir, H. Content based image retrieval with sparse representations and local feature descriptors: A comparative study, *Pattern Recognition*. 2017. **68**. P. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.03.006>.
20. Xu Zhang, Felix X. Yu, Svebor Karaman, Shih-Fu Chang. Learning Discriminative and Transformation Covariant Local Feature Detectors. *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2017. P. 6818-6826.
21. 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. *Радиоэлектроника, информатика, управления*. 2020. №4. С. 85-94. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-9>.

REFERENCES

1. Gorokhovatskyi, V.O. & Gadetska, S.V. (2020), *Statistical processing and data mining in structural image classification methods*, monograph, FLP Panov A.N., Kharkiv, 128 p., DOI: <https://doi.org/10.30837/978-617-7859-69-6>.
2. Duda, R.O., Hart, P.E. & Stork, D.G. (2000), *Pattern classification*, 2ed., Wiley, 738 p.
3. Flach, P. (2015), *Machine learning. The science and art of building algorithms that extract knowledge from data*, DMK Press, Moscow, 400 p.
4. Gorokhovatskyi, V.O., Pupchenko, D.V. & Solodchenko, K.G (2018), “Analysis of properties, characteristics and results of application of the newest detectors for definition of special points of the image”, *Control, navigation and communication systems*, No.1 (47), pp. 93-98.
5. Tvoroshenko, I.S. & Gorokhovatskyi, V.O. (2019), “Intelligent Classification of Biophysical System States using Fuzzy Interval Logic”, *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 78 (14), pp. 1303-1315, DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i14.80>.
6. Kim, S. & Kweon I.-S. (2006), “Biologically motivated perceptual feature: Generalized robust invariant feature”, *Asian Conf. of Comp. Vision (ACCV-06)*, pp. 305-314.
7. Nong, Ye. (2013), *Data Mining: Theories, Algorithms, and Examples*, 1st. ed., CRC Press, Inc., USA.
8. Szeliski, R. (2010), *Computer Vision: Algorithms and Applications*, Springer, London, 979 p.
9. Svyrydov, A., Kuchuk, H. & Tsiapa, O. (2018), “Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study”, *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*, pp. 593-597, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>.
10. Porter, F.C. (2008), *Testing Consistency of Two Histograms*, ArXiv e-prints, pp. 1–35.
11. Gorokhovatskyi, V.O. & Ponomarenko, R.P. (2020), “Classification of images based on the formation of an independent system of clusters in the structural descriptions of the base of standards”, *Advanced Information Systems*, vol. 4, No. 2, pp. 17-23, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.04>.
12. Kohonen, T. (2001), *Self-Organizing Maps*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, DOI: <https://doi.org/10.5555/558021>.
13. Paklin, N.B. & Oreshkov, V.I. (2013), *Business analytics: from data to knowledge*, textbook, Peter, St. Petersburg, 704 p.
14. Gorokhovatskyi, V.A., Putyatin, E.P. & Stolyarov, V.S. (2017), “Study of the effectiveness of structural methods of image classification using a cluster data model”, *Radioelectronics, informatics, management*, No. 3 (42), pp. 78–85.
15. (2020), ORB feature detector and binary descriptor, available at: https://scikit-image.org/docs/dev/auto_examples/features_detection/plot_orb.html.
16. Wang, J, Markert, K. & Everingham, M. (2009), “Learning Models for Object Recognition from Natural Language Descriptions”, *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC-2009)*, London, UK, pp. 1-11.
17. Josiah, Wang, Katja, Markert and Mark, Everingham (2013), *Learning Models for Object Recognition from Natural Language Descriptions*, available at: <http://www.josiahwang.com/projects/leedsbutterfly>.
18. Gorokhovatskyi, V.O., Gadetska, S.V. & Ponomarenko, R.P. (2019), “Logical analysis and data processing for image classification based on the formation of a statistical description center”, *Control, navigation and communication systems*, No. 4(56), pp. 43–48, DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.4.043>.
19. Celik, C. and Sakir, H. (2017), “Content based image retrieval with sparse representations and local feature descriptors: A comparative study”, *Pattern Recognition*, Issue 68, pp. 1-13, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.03.006>.

20. Xu, Zhang, Felix, X. Yu, Svebor Karaman, & Shih-Fu. Chang (2017), "Learning Discriminative and Transformation Covariant Local Feature Detectors", *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 6818-6826.
21. Gorokhovatskyi, V.O, Gadetska, S.V., Styahlyk, N.I. & Vlasenko, N.V. (2020), "Classification of images based on an ensemble of statistical distributions by standard classes for structural description components", *Radio Electronics, Computer Science, Control*, No. 4, pp. 85–94, DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-9>.

Received (Надійшла) 24.12.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.02.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

- Гороховатський Володимир Олексійович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Volodymyr Gorokhovatsky – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Computer Science Department, Kharkiv National University of RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: gorokhovatsky.vl@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7839-6223>.
- Гадецька Світлана Вікторівна** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри вищої математики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна;
Svitlana Gadetska – Candidate of physical and mathematical Sciences, Associate Professor of Higher Mathematics Department, Kharkiv National Automobile and Road University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: svgadetska@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9125-2363>.
- Жадан Олексій Віталійович** – студент кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Oleksii Zhadan – student of Computer Science Department, Kharkiv National University of RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: oleksii.zhadan@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3415-8450>.
- Хвостенко Олександр Олександрович** – студент кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Oleksandr Khvostenko – student of Computer Science Department, Kharkiv National University of RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: oleksandr.khvostenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1272-4634>.

**Исследование-результативности классификаторов изображений
на основе статистических распределений для компонентов структурного описания**

В. А. Гороховатский, С. В. Гадецкая, А. В. Жадан, А. А. Хвостенко

Аннотация. Предметом исследования являются модели для построения классификаторов изображений в пространстве описаний как множества дескрипторов ключевых точек при распознавании визуальных объектов в системах компьютерного зрения. **Целью** является создание и изучение свойств классификатора изображений на основе построения ансамбля распределений для компонентов структурного описания с использованием различных моделей принятия классификационных решений, что обеспечивает результативную классификацию. **Задача:** построение моделей классификации в синтезированном пространстве образов вероятностных распределений, анализ параметров, что воздействуют на их эффективность, экспериментальное оценивание результативности классификаторов средствами программного моделирования по результатам обработки экспериментальной базы изображений. Применяемыми **методами** являются: детектор ORB для формирования дескрипторов ключевых точек, интеллектуальный анализ данных, математическая статистика, средства определения релевантности для множеств векторов данных, программное моделирование. Полученные **результаты:** Разработанный метод классификации подтверждает свою работоспособность и эффективность для классификации изображений. Результативность метода может быть усилена введением многообразия видов метрик и мер сходства между центрами и дескрипторами, выбором способа формирования центров для эталонных описаний, введением логической обработки и сжатия структурного описания. Наилучшие результаты классификации показала модель с использованием наиболее весомого класса по вектору распределений для каждого дескриптора, что соответствует параметру моды. Использование концентрированной доли данных описания дает возможность улучшить его отличимость от других описаний. Применение медианы как центра описания имеет преимущество над средним значением. **Выводы.** **Научная новизна** - разработка эффективного метода классификации изображений на основе внедрения системы вероятностных распределений для компонентов данных, что способствует углубленному анализу в пространстве данных и повышает результативность классификации. Классификатор реализован в вариантах сопоставления интегрального представления распределений по классам и на основании анализа моды для распределений отдельных компонентов. **Практическая значимость** работы - построение моделей классификации в видоизмененном пространстве данных, подтверждение работоспособности предложенных модификаций анализа данных на примерах изображений, разработка программных моделей для внедрения предложенных методов классификации в системах компьютерного зрения.

Ключевые слова: компьютерное зрение; классификация изображений; ключевая точка; детектор ORB; дескриптор; центр описания; статистическое распределение; релевантность описаний; результативность классификации.

Study of the effectiveness of image classifiers by statistical distributions for components of structural description

Volodymyr Gorokhovatskyi, Svitlana Gadetska, Oleksii Zhadan, Oleksandr Khvostenko

Abstract. The subject of research is models for constructing image classifiers in the description space as a set of descriptors of key points in the recognition of visual objects in computer vision systems. **The goal** is to create and study the properties of the image classifier based on the construction of an ensemble of distributions for the components of the structural description using various models of classification decisions, which provides effective classification. **Tasks:** construction of classification models in the synthesized space of images of probability distributions, analysis of parameters influencing their efficiency, experimental evaluation of the effectiveness of classifiers by means of software modeling based on the results of processing the experimental image base. The applied **methods** are: ORB detector for formation of keypoint descriptors, data mining, mathematical statistics, means of determining relevance for sets of data vectors, software modeling. The obtained **results:** The developed method of classification confirms its efficiency and effectiveness for image classification. The effectiveness of the method can be enhanced by the introduction of a variety of types of metrics and measures of similarity between centers and descriptors, by the choice of method of forming centers for reference etalon descriptions, by the introduction of logical processing and compression of the structural description. The best results of the classification were shown by the model using the most important class by the distribution vector for each descriptor corresponding to the mode parameter. The use of a concentrated part of the description data makes it possible to improve its distinction from other descriptions. The use of the median as the center of description has an advantage over the mean. **Conclusions.** Scientific novelty is the development of an effective method of image classification based on the introduction of a system of probability distributions for data components, which contributes to in-depth analysis in the data space and increases in classification effectiveness. The classifier is implemented in the variants of comparing the integrated representation of distributions by classes and on the basis of mode analysis for the distributions of individual components. **The practical importance** of the work is the construction of classification models in the modified data space, confirmation of the efficiency of the proposed modifications of data analysis on examples of images, development of software models for implementation of the proposed classification methods in computer vision systems.

Keywords: computer vision; image classification; key point; ORB detector; descriptor; description center; statistical distribution; description relevance; classification effectiveness.

Information systems modeling

UDC 004.04:004.67:004.77

doi: 10.20998/2522-9052.2021.1.02

Mykhailo Mozhaiev¹, Pavlo Buslov²

Hon. Prof. M.S. Bokarius Kharkiv Research Institute of Forensic Examinations, Kharkiv, Ukraine
Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

METHOD OF MODELING OF A SOCIAL PROFILE USING BIG DATA STRUCTURE TRANSFORMATION OPTIMIZATION

Abstract. The object of the research are methods and algorithms of optimizing of the Big Data transformation to build a social profile model, the subject of the research are methods of constructing of a social profile. For decision-making person, the problem of scientific methodological and instrumental re-equipment is relevant for the effective fulfillment of a set of managerial tasks and confronting of fundamentally new challenges and threats in society. This task is directly related to the problem of building of a model of the social profile of both the individual and the social group as a whole. Therefore, the problem of optimizing of methods of constructing of a mathematical model of a social profile is certainly relevant. During the research, methods of the mathematical apparatus of graph theory, database theory and the concept of non-relational data stores, Big Data technology, text analytics technologies, parallel data processing methods, methods of neural networks' using, methods of multimedia data analyzing were used. These methods were integrated into the general method, called the method of increasing of the efficiency of constructing of a mathematical model of a social profile. The proposed method improves the adequacy of the social profile model, which will significantly improve and simplify the functioning of information systems for decision-making based on knowledge of the social advantages of certain social groups, which will allow dynamic correction of their behavior. The obtained results of testing the method make it possible to consider it as an effective tool for obtaining of an objective information model of a social portrait of a social group. This is because the correctness of setting and solving of the problem ensured that adequate results were obtained. Unlike the existing ones, the proposed modeling method, which uses an oriented graph, allows to improve significantly the quality and adequacy of this process. Further research should be directed towards the implementation of proposed theoretical developments in real decision-making systems. This will increase the weight of automated decision-making systems for social climate analysis.

Keywords: social profile model; information decision-making systems; graph theory; Big Data technologies; social portrait of a social group.

Introduction

In the context of development of digital economy and informatization of most social processes, the tasks of managing of social and economic systems acquire a new specificity, both in terms of goals and in terms of methods and tools used. For the decision-making person, the problem of scientific, methodological and instrumental re-equipment is relevant for the effective fulfillment of a set of managerial tasks and confronting fundamentally new challenges and threats in society. Mathematical, informational and technical support is needed to enable collection, storage, monitoring, and analysis of large amounts of heterogeneous data generated by all available Internet resources and services (information and news portals, personal blogs, thematic forums, etc.) with the possibility of social profiling (individuals, various groups, social phenomena, events, processes), establishing explicit and hidden relationships between personal and group profiles, as well as identifying causal dependencies in the information field of the society.

Accordingly, new opportunities open for solving very complex and ambiguous problems related to assessment of social tension in the context of individual focus groups, forecasting the consequences of introduction of certain innovations in the life of society, identification and verification of the digital personality (to prevent compromising people by attackers using

unauthorized access to personal accounts, counterfeiting accounts using technical means and artificial intelligence methods), developing service-oriented intelligent Internet technologies, and so on.

A special promise is integration of the latest information technologies related to collection and processing of large unstructured data (Big Data), intelligent data analysis (Data Mining) and distributed databases.

1. Research object and its technological audit

Big Data [1], a modern IT industry, includes a range of methods, tools, and technologies for collecting and analyzing of large amounts of different structured and unstructured data in order to achieve efficient results in the context of information distribution across multiple nodes of a computing network and its continuous updating. It is also permissible to apply the said period to the data itself, which are processed using this technology. Initially, the term Big Data was used in the academic environment to solve problems related to growth and diversity of data.

The first Big Data-based solutions appeared in the second half of the zero years and were considered as alternative ones to the classic relational DBMS in Business Intelligence [2].

The technology in question can be applied in cases where there is too much data to be processed by conventional means, in particular a server with a

relational DBMS. However, the exact quantitative values of information at which data becomes "great" are not determined. The application of the technology depends on the computing hardware power and the number of records in the database, that is, in some cases, gigabytes of data can already be considered as Big Data, since the computer system does not cope with their timely processing, and in others, petabytes of information are acceptable processed using classical methods and, therefore, are not "large" ones. Big Data is often associated with the Hadoop framework [3, 4], although this technology is also based on the concept of NoSQL data stores [5, 6].

The main sources of big data are sensors, measuring devices, cellular network equipment, audio-video recording devices, message streams inside social networks, blogs and news feeds, satellites. According to Cisco [7], mobile traffic in 2014 amounted to 2.5 Exabyte's per month, and it increased by more than 9.5 times in 2019. The development and widespread dissemination of electronic sources of information has led to introduction of BD technologies in various areas of activity. This is due, among other things, to an increase in accumulation of information in the Internet, which has become especially noticeable with an increase in the popularity of social networks. In the early 2010s, many developers of the IT product market began to use the technology in question directly in the context of big data processing and to produce their own analytical solutions.

Despite the seeming advantage over classic tools, social media analytics of the Internet has a number of problems. The main disadvantages of existing methods of social analytics are the following [8-12]:

- Low prevalence of technologies to handle large amounts of data, resulting in inefficient use of computing resources and additional economic costs;
- Focus of existing solutions on a narrow range of tasks related largely to statistical social research and marketing;
- Difficulties in dealing with information structures that are highly unstructured and heterogeneous;
- Presence in social data of such properties as inconsistency, insufficiency, linguistic inaccuracy, emotional coloring, which interfere with their objective assessment and interpretation;
- Question of legality of use of obtained information by third persons;
- Lack of integration of various information technologies for analysis of text and multimedia data within a single system;
- Complexity of information storage and protection.

To eliminate the above drawbacks, it is necessary to create new and refine existing methods for processing personalized social data, compile algorithms for analyzing heterogeneous text and multimedia information, storage and presentation models of initial, intermediate analyzed and resulting data.

As a tool to increase the efficiency of methods for processing personalized social data, graph theory and an algorithm for enumerating of sections were chosen.

2. The purposes and tasks of the research

Within the framework of this research, the need to study and use a number of technological and theoretical tools is revealed: the mathematical apparatus of graph theory, database theory and the concept of non-relational data stores, Big Data technology, text analytics technologies, parallel data processing methods, and methods of neural networks' using, methods for analyzing multimedia data.

The purpose of this article is to improve the methods of automated transformation of unstructured social data from public sources into a structured picture of a person or group of persons by developing algorithms for enumerating of sections, which contain methods of formation of new sections, method of formation of new sections from already built ones, a procedure for eliminating excess elements and a search order.

To achieve this purpose, the research needs to solve the following private tasks:

1. To investigate methods and tools used in automated transformation of unstructured social data.
2. To develop algorithms of sections' enumeration that improve Big Data conversion efficiency.

3. Research of existing solutions of the problem

Social profiling results based on analysis of public sources of information should have a number of properties, such as explicit structuring, scalability, presentation both in the form of tables and images (graphs, diagrams) [13-18]. This is necessary to enable them to be used in social research applications. Currently, the most relevant areas of application of social profiles are marketing and law enforcement [9-12]. The first group includes collaborative filtering tasks, the solution of which allows improving the quality of advertising campaigns by taking into account the interests of the target audience and predicting its reaction. As a result, it allows us to optimize the costs of marketing research (surveys' conducting, target groups' forming, etc.) and to promote goods and services purposefully, as well as to increase customer loyalty. In the field of law enforcement, the task of building of social profiles intersects with open source intelligence (OSINT). Law enforcement agencies use personal and group profiles to assess the level of social tension and possible reactions of society to provocative actions, to create the "risk groups," and to collect the files for investigative and judicial measures.

4. Research methods

Within the framework of this research, the need to study and use of the following number of technological and theoretical tools is revealed: the mathematical apparatus of graph theory, database theory and the concept of non-relational data stores, Big Data technology, text analytics technologies, parallel data processing methods, methods of neural networks' using, methods of multimedia data analyzing. Modern developments in the developed countries of the world in the field of information, processing and transmission

have led to study of oriented information networks, which have wide practical applications.

These networks can often be mathematically described as an oriented graph. We call (s, t) a network when it is necessary to distinguish it from a network with another source and drain. Let us denote it by $G(X, G)$. In this case

$$X = s \cup t \cup \{x_i\}_{i=1}^N -$$

is a set of vertices of the network, G – the reflection of X in X , which generates the arcs of the network.

The vertex of the orgraph will be called as terminal in one of two cases:

- No arc enters it;
- Not a single arc comes out of it. In the sense of this definition, the network vertices s and t are terminal.

The arcs and vertices of network G are called network elements; we denote their set as E .

For network G , we introduce the ratio of the continuity of elements in this way, if i is the vertex of the network, then $\sigma(i)$ is the set of arcs & from it, and if i is an arc, then $\sigma(i)$ is the vertex into which this arc enters.

Let it be $i \in \sigma^{-1}(j)$, if $j \in \sigma(i)$. In other words, $\sigma^{-1}(j)$ it is a plurality of elements, for which element j is a successor. Let us note that the continuity ratio of σ elements can be entered on any oriented graph without loops. A network G with a plurality of elements E , for which the ratio σ is given, is denoted through $G(E, \sigma)$.

Let us consider that the network elements are set by numbers.

We call the correct numbering of elements (by analogy with the correct numbering of vertices) such one that if $j \in \sigma(i)$, then $i < j$, where i, j are the numbers of the network elements.

Let's note that the elements of the finite orgraph $G(E, \sigma)$ without loops can always be correctly numbered. Indeed, it is possible to construct a one-to-one mapping (of graph $G(E, \sigma)$ to graph $F(X, G)$), in which the set of vertices X corresponds to the set E of elements of graph G , and the relation of the contiguity of vertices G is the ratio of the continuity of elements σ on graph G . It is known that on graphs of the form (X, G) , for vertices it is always possible to set the correct numeration [13-20]. Therefore, it can be set on the set E of elements of the graph $G(E, \sigma)$, which follows from the mutual uniqueness of the mapping ψ . Let us call with a mixed (s, t) section or a mixed terminal section such a set of P -elements of the network that if they are removed from it, then there will be no terminal path.

The element l is called as redundant in section P if the set of elements $\{P \setminus l\}$ is also a section [21].

A section that does not contain redundant features is minimal, and a section that contains redundant features is redundant. In an excess section view, there is always a feature that can be deleted without violating a specific section property. Let us note that from one excess section we can sometimes form several minimal sections, except various excess vertices.

As a source section, we take a set of elements

$$P_0 = \sigma(s).$$

Clearly, there can be no redundant elements in it. In the original section, the elements are arranged in ascending order.

From each section $P = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$, which was formed, we can create $l \leq n$ new sections.

If $t \in \sigma(l_i)$, then

$$P_i = ((P \setminus l_i) \cup \sigma(l_i)) \setminus I_i, \quad (1)$$

where I_i – is the set of redundant elements in P_i .

In each newly constructed section, we will tidy up the elements by number growth, and replace the elements with the same numbers with others. All formed sections are entered in the general list of sections in lexicographic order by growth of numbers of composite elements. Let us note that when creating cuts with P , replacing various elements l_i with $\sigma(l_i)$ the same minimum section can be formed several times, which should be listed only for the first time.

Due to the correct numbering of the network elements, each newly constructed section is placed in a lexicographically ordered list after the section on which it is built.

Let us consider a way to exclude redundant elements from each P -built section

$$\tilde{P} = (P \setminus l_i) \cup \sigma(l_i). \quad (2)$$

In the section, will $\tilde{P}$ some element r_j be redundant if all (s, r_j) paths or all (r_j, t) paths pass through some element $r_k \in P$. But for the accepted method of sections' creating on (s, r_j) paths of similar elements there can not be r_k in section $\tilde{P}$. Therefore, the search for redundant elements should be done, considering only segments of (r_j, t) paths.

We will put in order the elements by number growth in the generated section $\tilde{P}$. Then, to check for redundancy r_j concerning overshoot we can take into account the pieces of (r_j, t) paths, on which the number of the last element is no more than the number of the last element in the section $\tilde{P}$.

Let us denote as

$$\tilde{P} = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$$

a section, that is formed from a section

$$P = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$$

by replacing l_i with $\sigma(l_i)$. The procedure of excluding of redundant elements is the following.

The viewed sections are selected from the list of constructed sections in lexicographic order by their component numbers. When we view a section from it, new sections are generated by replacing those elements l_i for which $\sigma(l_i)$ do not have a t drain.

Let us consider how to convert a section list to a network. In a formalized form, this task can be formulated as follows.

There is a list μ , consisting of M rows $S_1, \dots, S_M$, which has the following features.

1. The row $S_i = (a_{i1}, \dots, a_{im})$ contains m_i non-repeating alphabet characters $A = \{a_i\}_{i=1}^N$.
2. Any character permutation in a row is allowed.
3. There are no $S_i, S_j \in \mu$, such that $S_i \leq S_j$.
4. There is at least one character pair a_i, a_j , for which no row $S_k \in \mu$ exists, such that $a_i \in S_k, a_j \in S_k$. In this case, we will say that the symbols a_i i a_j are incompatible.

We need to build the minimum orgraph $R(Y, F)$ by the number of vertices, which has such properties.

In fact, this means that we need to define the order of characters in the list rows in order to combine the maximum number of matching characters in the rows and the incompatible characters would be in one row.

Let's select the three characters a_i, a_j i a_k such, that symbol a_i belongs to two rows at the same time S_p i S_q .

Let us introduce such concepts of form as direct form:

$$f = a_i(a_j, a_k), \quad (3)$$

and inverse form

$$\bar{f} = (a_j, a_k)a_i. \quad (4)$$

The forms f_1 i f_2 we call as equivalent if $f_1 = a_i(a_j, a_k)$, a $f_2 = a_i(a_k, a_j)$. The forms f_1 i f_2 we call as alternative to each other if $f_1 = \bar{f}_2$ or $f_2 = \bar{f}_1$. Let's talk that f_i contradicts f_j , if the general system of inequalities formed by forms f_i i f_j , is non-essential. It is obviously, that the form $f = a_i(a_j, a_k)$ can only conflict with the following forms:

$$\begin{aligned} f_1 &= a_j(a_i, a_l); \quad f_2 = a_k(a_i, a_l); \\ f_3 &= (a_j, a_l)a_i; \quad f_4 = (a_k, a_l)a_i, \end{aligned} \quad (5)$$

where $\ell \in \overline{(1, N)}$.

Let's compose the initial system of forms $\Sigma = \Sigma_0$, that contains straight forms for all such triples of characters. Let us number the forms of this system (let them be Q pieces) and compose a matrix of contradictions of forms.

5. Research results

We will change the system of forms Σ , replacing, where it is necessary, the forms that contain it, with alternative ones to receive a system $\Sigma = \Sigma^*$ containing a minimum number of conflicting forms.

The value $\delta_i > 0$ is the indicator of the need to replace the form f_i with f_i^* .

We introduce auxiliary vectors D^+, D^- i Δ into consideration, in which, when replacing the form f_i with $\bar{f}_i$ i-row i and i -column of matrix V , is changed, as well as some components of the vectors D^+, D^- i Δ according to the following rule:

1. We replace v_{ij} with $-v_{ij}$ in the i -column of V matrix, $j = 1, \dots, Q$, at the same time

$$\begin{aligned} d_i^+(new) &= d_i^-(old), \quad d_i^-(new) = d_i^+(old), \\ \delta_i(new) &= -\delta_i(old). \end{aligned} \quad (6)$$

2. We replace v_{ki} with $-v_{ki}$ in the i -column of V matrix, $k = 1, \dots, Q$.

Doing the same for those f_i , in which $\delta_i > 0$, we gradually reduce the total number of contradictions in the system Σ , until it turns out that all $\delta_i \leq 0$, $i = 1, \dots, Q$, i and get a system of forms $\Sigma = \Sigma^*$ with a minimum number of contradictions. It will give a partial (or complete) order on the set of characters A , which will allow combining the maximum number of characters in rows to construct a graph of the necessary form.

6. SWOT analysis of research results

Strengths. The strengths of this research are that a comparative analysis of methods of personalized social data processing was carried out. Besides, the compilation of algorithms of analyzing of heterogeneous text and multimedia information, storage and presentation models of initial, intermediate analyzed and resulting data were made. It was established that the most promising is the use of the mathematical apparatus of graph theory, database theory and the concept of non-relational data stores, Big Data technology, text analytics technologies, parallel data processing methods, methods of neural networks' using, methods of multimedia data analyzing.

As a result, an oriented orthograph was built, which is a mathematical model of an oriented information system.

Weaknesses. The weaknesses of this research are related to the fact that the result is only a model of an oriented information system, which does not fully reflect the entire variety of existing and promising systems of processing of personal data and building of a social profile of both individuals and social groups of various differentiations.

Opportunities. The additional possibilities when using the above results in systems, as well as identification and verification of a digital image of a person are to optimize the required time and to improve the quality of such systems.

Threats. The options proposed in this paper are theoretical. Practical processing and justification prior to possible implementation solutions are required.

Conclusions

1. To improve the efficiency of automated conversion of unstructured social data, it is desirable to use OSINT technologies and supplement them using methods and algorithms to optimize Big Data transformation by building oriented graphs.

The rationale for using such an apparatus is the correct application of the theory of processing of large amounts of data and the theory of oriented graphs. The result of implementation of the algorithm is the ability to build an oriented graph, which is a mathematical

model of oriented information networks that are quite often used in practice.

2. Thus, we have gained a new opportunity to further improve the functioning of computer information networks by optimizing of data structures by converting the information list into a corresponding oriented graph.

3. Further research should be directed towards the implementation of proposed theoretical developments in real decision-making systems. This will increase the weight of automated decision-making systems for analyzing of the social climate of society.

REFERENCES

1. Mayer-Schönberger, Viktor and Cukier, Kenneth (2013), *Big Data: A Revolution that Will Transform how We Live, Work, and Think*, Business & Economics, Houghton Mifflin Harcourt, 242 p.
2. White, T. (2015), *Hadoop: The Definitive Guide*, O'Reilly Media, Inc., 235 p.
3. Tiwari, G. (2011), *NoSQL: What It Is and Why You Need it > Definition and Introduction*, Professional NoSQL, Packt Publishing, 384 p.
4. Saravana, Balaji B., Karthikeyan, N.K. and Raj Kumar, R.S., (2018), "Fuzzy service conceptual ontology system for cloud service recommendation", *Computers & Electrical Engineering*, Vol. 69, pp. 435–446, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2016.09.013>.
5. Merlac, V., Smatkov, S., Kuchuk, N. and Nechausov A. (2018), "Resources Distribution Method of University e-learning on the Hyperconvergent platform", *Conf. Proc. of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Service and Technologies. DESSERT'2018*, Ukraine, Kyiv, May 24-27, pp. 136-140, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409114>
6. Mozhaiyev, M., Kuchuk, N. and Usatenko, M. (2019), "The method of jitter determining in the telecommunication network of a computer system on a special software platform", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, Vol. 4 (10), pp. 134-140. doi: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.10.134>.
7. Kuchuk, G., Kovalenko, A., Komari, I.E., Svyrydov, A. and Kharchenko, V. (2019), "Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method", *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171, Kharchenko, V., Kondratenko, Y. (Eds.), Springer Nature Switzerland AG, pp. 161-183, DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8
8. Manyika, J., Chui, M., Brown, B., Bughin, J., Dobbs, R., Roxburgh, C. and A Byers, Hung (2011), "Big data techniques and technologies", *Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity*, McKinsey Global Institute, pp. 27-31.
9. Donets, V., Kuchuk, N. and Shmatkov, S. (2018), "Development of software of e-learning information system synthesis modeling process", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No 2, pp. 117–121, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.20>.
10. Dhivakar, B., Saravanan, S.V., Sivaram, M. and Krishnan R.A. (2012), "Statistical Score Calculation of Information Retrieval Systems using Data Fusion Technique", *Computer Science and Engineering*, Vol. 2, Issue 5, pp.43-45, doi: <http://doi.org/10.5923/j.computer.20120205.01>
11. Sivaram, M., Yuvaraj, D., Amin Salih, Mohammed, Porkodi, V. and Manikandan V. (2018), "The Real Problem Through a Selection Making an Algorithm that Minimizes the Computational Complexity", *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, Vol. 8, iss. 2, 2018, pp. 95-100.
12. Buslov, P. (2017), "Analysis of using the features of communication models in social groups and virtual communities", *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, vol. 23, issue 1, pp. 39-44.
13. Swami, M. and Thulasiraman, K. (1984), *Graphs, networks and algorithms*, Mir, Moscow, 455 p.
14. Kovalenko, A. and Kuchuk H. (2018), "Methods for synthesis of informational and technical structures of critical application object's control system", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 22–27, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
15. Kuchuk G.A., Mohammad A.S. and Kovalenko, A.A. (2011), "The parametric data transmission control method for modifying the transport protocols of wireless networks", *Information Processing Systems*, No. 8 (98), pp. 211-218.
16. Kuchuk G.A., Mohammad A.S. and Kovalenko, A.A. (2011), "Method for reducing data transmission time in a wireless network", *Control, navigation and communication systems*, No. 3 (19), pp. 209-213.
17. Ruban, I., Kuchuk, H. and Kovalenko A. (2017), "Redistribution of base stations load in mobile communication networks", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No 1 (1), P. 75–81, doi : <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.075>.
18. Nechausov, A., Mamuzić, I. and Kuchuk, N. (2017), "Synthesis of the air pollution level control system on the basis of hyperconvergent infrastructures", *Advanced Information Systems*, Vol. 1, No. 2, pp. 21–26, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.04>.
19. Zubov, V.S. (1999), *Programmer's handbook. Basic methods of solving graph problems and sorting*, IIID House "Filin". Moscow, 256 p.
20. Shamraev, A., Shamraeva, E., Dovbnya, A., Kovalenko, A. and Ilyunin, O. (2017), "Green microcontrollers in control systems for magnetic elements of linear electron accelerators", *Studies in Systems, Decision and Control*, 74, pp. 283-305, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-44162-7_15
21. Ore, O. (1968), *Graph theory*, Nauka, Moscow, 336 p.

Received (Надійшла) 28.10.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.01.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Можасв Михайло Олександрович – кандидат технічних наук, завідувач сектором комп'ютерно-технічних, телекомунікаційних досліджень та досліджень відео-, звукозапису Харківського науково-дослідного інституту судових експертиз імені засл. проф. М. С. Бокаріуса, Харків, Україна;

Mykhailo Mozhaiev – Candidate of Technical Sciences, Head of Department of Computer Engineering, Telecommunications, Video- and Audio-recording Research, Hon. Prof. Bokarius Kharkiv Research Institute of Forensic Examinations, Kharkiv, Ukraine; e-mail: mikhail.mozhayev@hniise.gov.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1566-9260>.

Буслов Павло Володимирович – аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Pavlo Buslov – postgraduate student, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: p.buslov@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2558-4984>.

**Метод моделювання соціального профілю
з використанням оптимізації перетворення структур Big Data**

М. О. Можасв, П. В. Буслов

Анотація. Об'єктом дослідження є методи та алгоритми оптимізації перетворення Big Data для побудови моделі соціального профілю, предметом дослідження – методи побудови соціального профілю. Для особи, яка приймає рішення, актуальна проблема науково методологічного і інструментального переоснащення для ефективного виконання комплексу управлінських завдань і протистояння принципово новим викликам і загрозам у суспільстві. Це завдання безпосередньо пов'язана з проблемою побудови моделі соціального профілю як індивідуума, так і соціальної групи в цілому. Тому задача оптимізації методів побудови математичної моделі соціального профілю є безумовно актуальною. В ході дослідження використовувалися методи математичного апарату теорії графів, теорії баз даних і концепції нереляційних сховищ даних, технології Big Data, технології текстової аналітики, методів паралельної обробки даних, методів застосування нейронних мереж, методів аналізу мультимедіа даних. Дані методи були інтегровані в загальний метод, названий методом покращення ефективності побудови математичної моделі соціального профілю. Запропонований метод дозволяє покращити адекватність моделі соціального профілю, що дозволить суттєво покращити та спростити функціонування інформаційних систем прийняття рішень, які ґрунтуються на знаннях про соціальні переваги тих чи інших суспільних груп, що дозволить здійснювати динамічну корекцію їх поведінки. Отримані результати апробації методу дозволяють вважати його ефективним інструментом отримання об'єктивної інформаційної моделі соціального портрету соціальної групи. Це пов'язано з тим, що коректність постановки і рішення задачі забезпечила отримання адекватних результатів. На відміну від існуючих, запропонований метод моделювання, який використовує орієнтований граф дозволяє суттєво покращити якість та адекватність цього процесу. Подальші дослідження необхідно спрямувати на реалізацію пропонуєваних теоретичних розробок в реальні системи прийняття рішень. Це дозволить збільшити вагу автоматизованих систем прийняття рішень для аналізу соціального клімату суспільства.

Ключові слова: модель соціального профілю; інформаційні системи прийняття рішень; теорія графів; технології Big Data; соціальний портрет соціальної групи.

**Метод моделирования социального профиля
с использованием оптимизации преобразования структуры Big Data**

М. А. Можасв, П. В. Буслов

Аннотация. Объектом исследования являются методы и алгоритмы оптимизации преобразования Big Data для построения модели социального профиля, предметом исследования – методы построения социального профиля. Для лица, принимающего решения, актуальна проблема научно методологического и инструментального переоснащения для эффективного выполнения комплекса управленческих задач и противостояния принципиально новым вызовам и угрозам в обществе. Эта задача непосредственно связана с проблемой построения модели социального профиля как индивидуума, так и социальной группы в целом. Поэтому задача оптимизации методов построения математической модели социального профиля является безусловно актуальной. В ходе исследования использовались методы математического аппарата теории графов, теории баз данных и концепции нереляционных хранилищ данных, технологии Big Data, технологий текстовой аналитики, методов параллельной обработки данных, методов применения нейронных сетей, методов анализа мультимедиа данных. Данные методы были интегрированы в общий метод, названный методом повышения эффективности построения математической модели социального профиля. Предложенный метод позволяет улучшить адекватность модели социального профиля, что позволит существенно улучшить и упростить функционирования информационных систем принятия решений, основанные на знаниях о социальных преимуществах тех или иных общественных групп, что позволит осуществлять динамическую коррекцию их поведения. Полученные результаты апробации метода позволяют считать его эффективным инструментом получения объективной информационной модели социального портрета социальной группы. Это связано с тем, что корректность постановки и решения задачи обеспечила получение адекватных результатов. В отличие от существующих, предложенный метод моделирования, который использует ориентированный граф позволяет существенно улучшить качество и адекватность этого процесса. Дальнейшие исследования необходимо направить на реализацию предлагаемых теоретических разработок в реальные системы принятия решений. Это позволит увеличить вес автоматизированных систем принятия решений для анализа социального климата общества.

Ключевые слова: модель социального профиля; информационные системы принятия решений; теория графов; технологии Big Data; социальный портрет социальной группы.

Ю. П. Сальник¹, Б. Ю. Волочій²¹ Національна академія сухопутних військ, Львів, Україна² Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ПОВЕДІНКИ ОХОРОННОЇ СИСТЕМИ ОБ'ЄКТА КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Анотація. Актуальність. Об'єкти критичної інфраструктури потребують надійної охорони. До охоронних систем таких об'єктів висувається ряд специфічних вимог. Виконання частини цих вимог може забезпечувати комплекс охоронної сигналізації, в якому використовуються сигналізаційні системи із сейсмічними датчиками. Другу частину вимог може виконати безпілотний авіаційний комплекс. Тому практична доцільність бачиться в поєднанні цих двох комплексів в одну охоронну систему з трьома зонами контролю. Першу (дальню) та другу (ближню) зони контролю обслуговує комплекс охоронної сигналізації. Третя зона контролю (зона супроводу порушника) призначається на основі даних від комплексу охоронної сигналізації про тип порушника, його швидкість та напрямок руху. Безпілотний авіаційний комплекс застосовують до виконання завдання охоронної системи в зоні супроводу порушника по команді від комплексу охоронної сигналізації. Для реалізації такої охоронної системи треба знати відповіді на два питання. Перше, яке значення показника ефективності охоронної системи забезпечить поєднання існуючих комплексів з їх показниками функціональності. І друге, якими мають бути вимоги до показників функціональності цих комплексів, щоб охоронна система забезпечувала необхідне значення показника ефективності. **Мета дослідження** – показати потенційне значення показника ефективності охоронної системи, сформованої з існуючих комплексів, а також оцінити можливість підвищення її ефективності. **Метод.** Досягнути поставленої мети дає змогу стохастична модель функціональної поведінки, яка має відтворювати всі варіанти реакції складових охоронної системи на перетин порушниками трьох зон контролю. **Результати.** Основним результатом є дискретно-неперервна стохастична модель функціональної поведінки охоронної системи об'єкта критичної інфраструктури у вигляді системи 76 диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена. Ступінь адекватності стохастичної моделі дає змогу, крім задачі аналізу ефективності охоронної системи, вирішувати задачу синтезу показників функціональності складових комплексів, які поєднані в охоронну систему. **Висновки.** Проведені дослідження показали, що для об'єктів критичної інфраструктури створювати охоронну систему з існуючих комплексів охоронної сигналізації та безпілотних авіаційних комплексів недоцільно через те, що вона буде мати недопустимо низьку ефективність. На основі розв'язання задачі синтезу, надані значення показників функціональності складових кожного комплексу зокрема, які забезпечать необхідне значення показника ефективності охоронної системи. Стохастична модель функціональної поведінки охоронної системи може бути використана в інформаційній технології її проектування для пошуку компромісних рішень між різними варіантами складу, структури та функціональної поведінки охоронної системи.

Ключові слова: стохастична модель; ефективність системи; функціональна поведінка системи; сигналізаційна система з сейсмічним датчиком; комплекс охоронної сигналізації; безпілотний авіаційний комплекс; охоронна система.

Абревіатура

БЗК – ближня зона контролю;
БП – базова подія;
БпАК – безпілотний авіаційний комплекс;
БпЛА – безпілотний літальний апарат;
ДЗК – дальня зона контролю;
зона СП – зона супроводження порушника;
КОС – комплекс охоронної сигналізації;
ОКІ – об'єкт критичної інфраструктури;
ОС – охоронна система;
ПДП – пункт дистанційного пілотування;
СПВІ – система приймання і відображення інформації;
СССД – сигналізаційна система із сейсмічним датчиком;
ФРП – формула розрахунку інтенсивності переходу.

Номенклатура

$P_{t.ex}$ – показник ефективності «Ймовірність того, що завдання ОС виконано»;
 $P_{u.c}$ – показник ефективності «Ймовірність обману користувача ОС»;
 $P_{t.ex.p}$ – показник ефективності «Ймовірність того, що завдання ОС виконано частково»;
 $P_{t.n.ex}$ – показник ефективності «Ймовірність того, що завдання ОС не виконано»;
 $P_{det UGS}$ – ймовірність виявлення порушника сигналізаційною системою КОС;

$P_{det UAV}$ – ймовірність виявлення порушника;
 $P_{id UGS}$ – ймовірність правильного розпізнавання типу порушника сигналізаційною системою комплексу охоронної сигналізації;
 $P_d UGS$ – ймовірність успішного доставлення повідомлення про порушника на СПВІ;
 $T_{det1} (T_{det2})$ – середнє значення інтервалу часу від моменту появи порушника в ДЗК (в БЗК) до моменту завершення формування сигналу для процедури розпізнавання його типу;
 $P_{id UAV}$ – ймовірність правильного розпізнавання типу порушника;
 $P_{des UAV}$ – ймовірність правильної ідентифікації порушника;
 $P_{d.c UAV}$ – ймовірність визначення координат порушника з необхідною точністю;
 $P_d UAV$ – ймовірність успішного доставлення інформації про порушника від ПДП до служби охорони ОКІ;
 t_{id} – тривалість процедури розпізнавання типу порушника;
 T_{det3} – середнє значення інтервалу часу від моменту появи порушника в зоні СП до моменту його виявлення;
 t_{des} – тривалість процедури ідентифікації порушника;

$t_{d.c}$ – тривалість процедури визначення координат порушника;

t_d – тривалість процедури доставлення повідомлення про порушника до служби охорони.

Вступ

В умовах сьогодення захист об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ) від терористичних та кримінальних атак стає все більш актуальним. Провідні фахівці країн світу розглядають можливість відмови у найближчому майбутньому від традиційних технічних засобів охорони на користь роботизованих комплексів наземного та повітряного базування. Велике різноманіття таких комплексів, що були розроблені в останні десятиліття, дає змогу створювати охоронні системи для ОКІ з урахуванням особливостей та умов виконання ними завдань [1-3].

В статтях доведена необхідність та доцільність оснащення служби охорони ОКІ комплексами охоронної сигналізації (КОС) [4-6] та безпілотними авіаційними комплексами (БпАК) [7-9]. Однак, крім чисельних суттєвих переваг зазначених комплексів, існують певні обмеження щодо їх застосування. Наприклад, застосування тільки КОС оснащених сигналізаційними системами з сейсмічними датчиками обмежується недостатньою достовірністю відомих методів розпізнавання типу порушника. Ймовірність визначення типу порушника для таких методів не перевищує 0,85 [10]. Крім того, такі КОС не забезпечують отримання координат порушника в масштабі реального часу (крім тих випадків, коли створюється розгалужена мережа сигналізаційних систем). Застосування тільки БпАК вирішує зазначені проблеми. Однак, застосування БпАК ускладнено ненадійністю його складових, а саме безпілотних літальних апаратів (більше 50% загальних втрат), обмеженим ресурсом та необхідністю тривалого дешифрування знімків місцевості (особливо у разі коли об'єкт, що охороняється, значний за розмірами або рознесений на місцевості). Тому спільне застосування КОС та БпАК у єдиній охоронній системі (ОС) може дати синергетичний ефект підвищення її ефективності.

1. Формулювання проблеми та аналіз літератури

Поєднання у ОС існуючих БпАК та КОС ускладнене відсутністю їх комплексування на технічному та інформаційному рівнях, суттєвими відмінностями в принципах застосування та обслуговування, інших. Відомо, що зазначені проблеми притаманні для всіх складних систем та їх вирішення здійснюється на етапі системотехнічного проектування перспективної системи [11–13].

Для розв'язання задачі системотехнічного проектування ОС використаємо запропоновані в статті [14] чотири показники ефективності: ймовірність того, що завдання ОС виконано; ймовірність того, що завдання ОС виконано частково; ймовірність того, що завдання ОС не виконано; ймовірність «обману користувача» ОС.

Визначення значень цих показників можливе двома шляхами: перший – проведення натурного експерименту, другий – проведення наукового експерименту з використанням стохастичної моделі [11].

Як вказано в монографії [12] ряд суттєвих переваг має другий шлях отримання показників ефективності. Оскільки стохастична модель представляє собою систему диференціальних рівнянь, то з їх допомогою можна для кожного варіанту умов і для заданих значень показників функціональності складових ОС обраховувати значення показників її ефективності.

Для реалізації наукового експерименту з використанням стохастичної моделі об'єкта дослідження для визначення показників ефективності ОС існує технологія її розроблення, яка забезпечує високий ступінь адекватності [14]. Зауважимо, що об'єктом дослідження є всі можливі варіанти реакції ОС на перетин порушниками зон контролю.

Тому метою статті є розроблення стохастичної моделі функціональної поведінки охоронної системи об'єкту критичної інфраструктури, яка для виконання поставлених завдань функціонально поєднує комплекс охоронної сигналізації та безпілотний авіаційний комплекс; модель повинна бути здатною відтворювати реакції складових охоронної системи на перетин порушниками трьох зон контролю.

2. Евристичний синтез структурно-функціональної схеми перспективної охоронної системи

Для проектування ОС розглянемо її як складну систему [12], тобто, як сукупність комплексів, що є складовими системи, яка призначена для виконання завдань з охорони ОКІ від терористичних та кримінальних атак. Більшості завдань з охорони ОКІ притаманні два етапи їх виконання. На першому етапі, здійснюється виявлення та розпізнавання порушника на дальніх підступах із визначенням напрямку його руху. На другому етапі, визначаються координати порушника для забезпечення подальших заходів із запобігання потрапляння порушника до ОКІ. Для виконання цих етапів типового завдання з охорони, технічні засоби охорони, які входять до складу ОС, повинні утворити три зони контролю (ЗК). Завданням сигналізаційних систем із сейсмічними датчиками (СССД), що входять в склад КОС, встановлених в дальній зоні контролю (ДЗК), є завчасне виявлення порушника, що перетинає ЗК, та визначення його типу. Сигналізаційні системи в ближній зоні контролю (БЗК) встановлюються на шляху імовірного висування порушника, на такій відстані від ДЗК, яка дозволяє з достатньою точністю визначити напрямок та швидкість його руху.

Напрямок руху, кількість та тип порушників визначені за повідомленнями, отриманими системою приймання і відображення інформації (СПВІ), від сигналізаційних систем встановлених в ДЗК і БЗК дають змогу розрахувати розміщення третьої зони

контролю. В цій зоні буде здійснюватися супроводження порушника за допомогою БпАК. Третя зона контролю, яку будемо називати зоною супроводження порушника (зона СП), це район, в якому у певний час прогнозовано пересування порушника виявленого і розпізнаного в ДЗК та БЗК.

Ефективність ОС, в якій поєднані КОС та БпАК, залежить від значень показників функціональності їх складових. Наприклад, для сигналізаційних систем КОС такими показниками є імовірність виявлення та правильного розпізнавання типу порушника, імовірність доставляння повідомлення про нього до СПВІ та середні значення інтервалів часу від появи порушника в зоні контролю до закінчення формування сигналу для процедури розпізнавання.

До складу КОС, структурна схема якого представлена в статті [15], входять: система прийняття та відображення інформації та дві сигналізаційні системи із сейсмічними датчиками, які розташовують

в зонах контролю. До складу кожної СССД входять: сейсмічний датчик, пристрій розпізнавання типу порушника та радіопередавач. До складу БпАК, структурна схема якого представлена в статті [16], входять БпЛА та пункт дистанційного пілотування (ПДП).

Об'єкт дослідження, тобто функціональну поведінку ОС у складі КОС та БпАК, представимо вербальною моделлю. У вербальній моделі показана послідовність виконання процедур складовими ОС.

3. Вербальна модель функціональної поведінки перспективної охоронної системи у складі КОС та БпАК

Розглянемо докладно процедури (рис. 1), які формують реакції ОС на перетин порушником зон контролю.

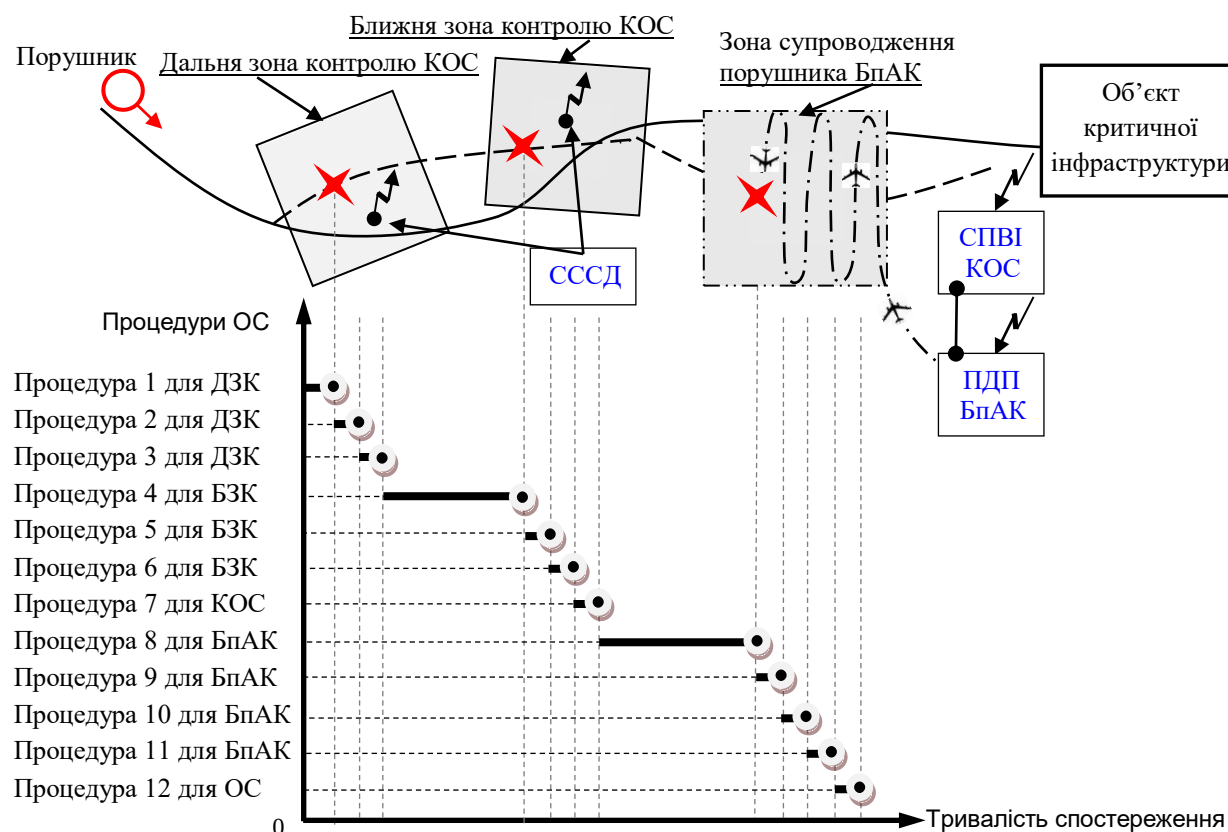


Рис. 1. Процес, що відповідає реакції ОС на перетин порушником трьох зон контролю

(Fig. 1. The process that corresponds to reaction of the security system to intersection of the violator of the three control zones)

У верхній частині рис. 1 представлена схема послідовного перетину порушником зон контролю під час його руху в напрямку ОКІ. На імовірному напрямку руху порушника встановлені дві зони контролю і показано визначене розміщення зони СП. Під час перетину порушником зон контролю послідовно виконуються описані нижче процедури, СПВІ приймає повідомлення сформовані в СССД, на ПДП приймається інформація від систем спостереження і передавання інформації БпЛА. У нижній частині рис. 1 показаний порядок виконання процедур згідно алгоритму функціонування

запропонованої ОС, які відображають формування її реакції на перетин порушником зон контролю. З рис. 1 видно, що реакція охоронної системи на перетин порушниками зон контролю відповідає дискретно-неперервному випадковому процесу. Розглянемо особливості виконання процедур представлених на рис. 1.

Процедури 1 та 4. Виявлення порушників, що перетинають зону контролю, сигналізаційною системою КОС.

Порушник може бути виявлений або не виявлений СССД. При цьому СССД технічно

справна і готова до роботи. Досконалість процедури характеризується показником функціональності – «Ймовірність виявлення порушника в зоні контролю». Його значення залежить від: відстані на якій порушник проходить від місця розташування СССД; використання порушником спеціального обладнання, що ускладнює його виявлення; типу ґрунту, в який встановлена СССД. Тривалість виконання процедури визначається з моменту появи порушника в зоні контролю та завершується передачею сигналу для процедури розпізнавання типу порушника. Складовими тривалості процедури є інтервал часу від моменту появи порушника в зоні контролю до моменту його фіксації сейсмічним датчиком та тривалості перетворення сейсмічного сигналу в електричний.

Процедури 2 та 5. Розпізнавання типу порушників виявлених сигналізаційною системою КОС в зоні контролю.

В результаті виконання зазначеної процедури тип порушника може бути розпізнаний правильно або не правильно. Досконалість процедури характеризується показником функціональності – «Ймовірність правильного розпізнавання типу порушника». Його значення залежить від багатьох чинників, в першу чергу від обраного методу розпізнавання.

Результат визначення типу порушника передається у повідомленні від СССД до СПВІ за допомогою радіопередавача.

Процедури 3 та 6. Доставляння повідомлень з інформацією про тип порушників від СССД встановлених в зоні контролю до СПВІ.

Від передавача кожної СССД повідомлення про тип порушника може бути доставлено до СПВІ з певною ймовірністю. Досконалість процедури характеризується показником – «Ймовірність успішного доставлення повідомлення про порушника до СПВІ». Недоставляння повідомлення про порушника до СПВІ може бути спричинено умовами поширення радіохвиль, наявністю радіозавад природного або техногенного характеру.

Процедура 7. Приймання рішення СПВІ про тип порушників та визначення зон СП на основі повідомлень сформованих СССД в кожній зоні контролю та доставляння повідомлення з цією інформацією до ПДП.

Порядок виконання сьомої процедури реалізовано в методі прийняття рішень, описаного в статті [15].

Процедура 8. Виявлення порушників, що перетинають зону СП, на пункті дистанційного пілотування БпАК. Ця процедура включає в себе збирання інформації про зону СП системою спостереження БпЛА, передавання її до ПДП для аналізу та виявлення порушника.

В результаті виконання цієї процедури на ПДП приймається рішення про наявність порушника в зоні СП за інформацією з БпЛА. Досконалість процедури характеризується показником функціональності розміщених на БпЛА систем спостереження та передавання інформації і

розміщеної на ПДП системи виявлення порушника – «Ймовірність виявлення порушника БпАК». Його значення залежить від: розмірів зони СП; складу та можливостей систем спостереження БпЛА, а також методу оброблення прийнятої інформації в ПДП.

Процедура 9. Розпізнавання типу порушників, виявлених в зоні СП, на пункті дистанційного пілотування БпАК.

В результаті виконання зазначеної процедури, по інформації отриманої від системи спостереження БпЛА, тип порушника може бути розпізнаний правильно або не правильно. Досконалість процедури характеризується показником функціональності – «Ймовірність розпізнавання типу порушника БпАК». Його значення залежить від можливостей обраного методу розпізнавання. Ці можливості, в свою чергу, залежать від якості системи спостереження БпЛА, від використання порушником засобів, що ускладнюють його розпізнавання, від погодних умов та інших. На завершення цієї процедури на ПДП підтверджується або не підтверджується правильність розпізнавання типу порушника виявленого в зонах, які контролює КОС.

Процедура 10. Ідентифікація порушників, виявлених в зоні СП, на пункті дистанційного пілотування БпАК.

В результаті виконання зазначеної процедури на ПДП отримується інформація про стан порушника, його приналежність (свій-чужий), інших характеристик та порушника відносять до певної категорії загрози ОКІ. Досконалість процедури характеризується показником функціональності – «Ймовірність правильної ідентифікації порушника». Його значення залежить від можливостей обраного методу ідентифікації. Ці можливості в свою чергу залежать, від якості сигналу системи спостереження БпЛА, від використання порушником засобів, що ускладнюють його ідентифікацію, від обмеження на час виконання процедури та інших факторів.

Процедура 11. Визначення поточних координат порушників, виявлених в зоні СП, на пункті дистанційного пілотування БпАК.

В результаті виконання процедури на ПДП отримується інформація за якою визначаються поточні координати порушника та параметри його руху (напрямок руху по відношенню до ОКІ та швидкість). Досконалість процедури характеризується показником функціональності – «Ймовірність визначення координат порушника з необхідною точністю». Його значення залежить від можливостей обраного методу визначення координат. Ці можливості, в свою чергу залежать, від якості навігаційної системи БпЛА, від використання порушником засобів радіоелектронної боротьби, що ускладнюють визначення його координат.

Процедура 12. Доставляння повідомлень з інформацією про порушників у зоні СП від ПДП до служби охорони ОКІ для проведення затримання (знешкодження) порушників.

Під час супроводження порушника інформація про нього від ПДП, з певною ймовірністю, може бути доставлена до служби охорони ОКІ. Досконалість процедури характеризується показником функціональності – «Ймовірність успішного доставлення інформації про порушника до служби охорони». Недоставлення інформації про порушника може бути спричинено, наприклад, умовами поширення радіохвиль, наявністю радіозавод природного або техногенного характеру.

4. Обґрунтування показників ефективності охоронної системи та компонування аналітичних виразів для їх визначення

В статтях [14, 15] показано, що в якості показників ефективності ОС доцільно використовувати «Ймовірність того, що завдання ОС виконано», «Ймовірність обману користувача ОС», «Ймовірність того, що завдання ОС виконано частково», «Ймовірність того, що завдання ОС не виконано».

Під час компонування формул для визначення значень показників ефективності запропонованої ОС необхідно врахувати всі можливі варіанти її реакції на перетин порушником зон контролю. Як показано на рис. 1, реакція ОС має початок в момент появи порушника в дальній зоні контролю і завершується в момент закінчення процедури 12.

Повний перелік варіантів складових реакцій КОС.

Реакція A_d , полягає в тому, що СССД встановлена в ДЗК виявила порушника, його тип розпізнаний правильно та повідомлення про тип порушника доставлено до СПВІ. В запропонованій стохастичній моделі така реакція буде представлена подіями закінчення процедур 1, 2 та 3 для ДЗК.

Реакція B_d , полягає в тому, що СССД встановлена в ДЗК виявила порушника, але його тип розпізнаний не правильно, повідомлення про тип порушника доставлено до СПВІ. В стохастичній моделі така реакція буде представлена подіями закінчення процедур 1, 2 та 3 для ДЗК.

Реакція C_d , полягає в тому, що СССД встановлена в ДЗК не виявила порушника. В стохастичній моделі така реакція буде представлена подією закінчення процедури 1 для ДЗК.

Такі ж реакції властиві для СССД встановленій в БЗК. Для них використаємо аналогічні позначення: A_b , B_b , C_b .

Функціональна поведінка ОС при розташуванні сигналізаційних систем КОС в двох зонах контролю передбачає, що рішення про тип порушника приймається після оброблення повідомлень від сигналізаційних систем ДЗК та БЗК за розробленим авторами методом прийняття рішення [15].

Завдання КОС вважається виконаним, якщо порушник виявлений, його тип розпізнаний правильно в кожній з двох зон контролю, на ПДП передано повідомлення з координатами зони СП та часом початку пошуку порушника в ній. Якщо тип порушника визначений в БЗК відрізняється від ДЗК, то в такому випадку, від СПВІ на ПДП для підтвердження передаються обидва повідомлення.

Повний перелік варіантів реакції БпАК.

Реакція A_c , полягає в тому, що БпАК виявив порушника, його тип розпізнаний правильно, ідентифікований, координати визначені з необхідною точністю. В стохастичній моделі така реакція буде представлена подіями закінчення процедур 7, 8, 9, 10 та 11 для зони СП.

Реакція B_c , полягає в тому, що БпАК виявив порушника, його тип розпізнаний правильно, ідентифікований, але координати не визначені з необхідною точністю. В стохастичній моделі така реакція буде представлена подіями закінчення процедур 7-11.

Реакція C_c , полягає в тому, що БпАК виявив порушника, його тип розпізнаний правильно, не ідентифікований, але координати визначені з необхідною точністю. В стохастичній моделі така реакція буде представлена подіями закінчення процедур 7-11.

Реакція D_c , полягає в тому, що БпАК виявив порушника, його тип розпізнаний правильно, але не ідентифікований та координати не визначені з необхідною точністю. В стохастичній моделі така реакція буде представлена подіями закінчення процедур 7-11.

Реакція E_c , полягає в тому, що БпАК виявив порушника, його тип розпізнаний не правильно, але координати визначені з необхідною точністю. В стохастичній моделі така реакція буде представлена подіями закінчення процедур 7, 8, 9, 10 та 11.

Реакція F_c , полягає в тому, що БпАК виявив порушника, але його тип розпізнаний не правильно та координати не визначені з необхідною точністю. В стохастичній моделі така реакція буде представлена подіями закінчення процедур 7, 8, 9, 10 та 11.

Реакція H_c , полягає в тому, що БпАК не виявив порушника. В стохастичній моделі така реакція буде представлена подією закінчення процедури 7.

Завдання БпАК вважається виконаним, якщо після отримання на ПДП повідомлення від КОС в зоні СП порушник буде виявлений, його тип розпізнаний правильно, правильно ідентифікований, координати визначені з необхідною точністю та повідомлення з інформацією про порушника доставлено службі охорони ОКІ.

Приймаючи до уваги описані вище варіанти реакції для кожної складової ОС, можливі такі результати роботи ОС в цілому: 1) «Завдання ОС виконано»; 2) «Обман користувача ОС»; 3) «Завдання ОС виконано частково»; 4) «Завдання ОС не виконано».

На рис. 2 у формі графа представлено всі можливі варіанти реакції запропонованої ОС у складі КОС та БпАК на перетин порушником трьох зон контролю. За графом, представленим на рис. 2, скомпоновані формули для визначення значень показників ефективності у вигляді сум умовних ймовірностей реакцій ОС. Показник ефективності ОС «Ймовірність того, що завдання ОС виконано» – це ймовірність того, що служба охорони ОКІ отримає від ПДП повідомлення про правильно розпізнаного та

ідентифікованого порушника і його поточні координати визначені з необхідною точністю, за умови, що в ПДП отримано повідомлення від СПВІ про порушника від обох зон контролю КОС. Цей показник будемо представляти сумою умовних апіорних ймовірностей:

$$P_{t.ex} = \sum_i p_i^A, \quad (1)$$

де p_i^A – умовна ймовірність виконання завдання ОС при i -му варіанті її реакції, для якої в зоні СП має бути представлена реакція A_C , за умови, що у ДЗК та БЗК були такі варіанти реакції КОС: A_D і A_B або B_D і A_B або A_D і B_B або B_D і B_B .

Перша складова формули (1) – p_i^A має таке обґрунтування: «Завдання ОС виконано», коли служба охорони ОКІ від ПДП отримує повідомлення

про правильно розпізнаного, ідентифікованого порушника та його координатами, що визначені з необхідною точністю, за умови, що в ПДП від СПВІ отримані повідомлення з правильно розпізнаним типом порушника в обох зонах контролю КОС. З використанням зазначених вище позначень реакції складових ОС першу складову формули (1) представимо умовною ймовірністю у вигляді:

$$p_1^A = P(A_C | A_D, A_B). \quad (2)$$

Решта умовних ймовірностей для формули (1) наведено в табл. 1.

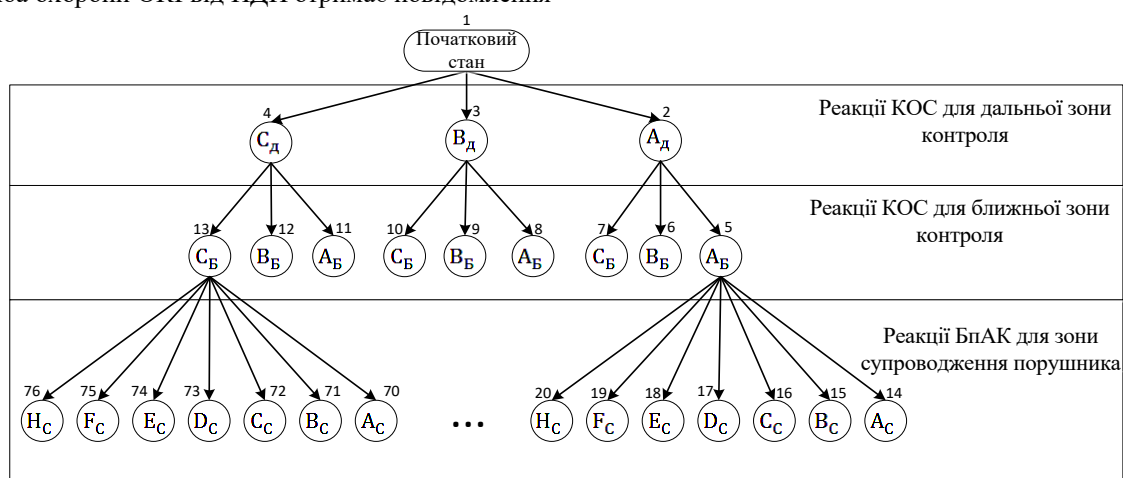


Рис. 2. Всі можливі варіанти реакції охоронної системи на перетин порушником трьох зон контролю
(Fig. 2. All possible options for the response of the security system to the intersection of the violator of the three control zones)

Таблиця 1 – Складові показники ефективності охоронної системи, до складу якої входять КОС та БпАК

Показники ефективності ОС			
«Ймовірність того, що завдання ОС виконано», $P_{t.ex}$	«Ймовірність обману користувача ОС», $P_{u.c}$	«Ймовірність того, що завдання ОС виконано частково», $P_{t.ex.p}$	«Ймовірність того, що завдання ОС не виконано», $P_{t.n.ex}$
$P(A_C A_D, A_B),$ $P(A_C A_D, B_B),$ $P(A_C B_D, A_B),$ $P(A_C B_D, B_B)$	$P(E_C A_D, A_B),$ $P(F_C A_D, A_B),$ $P(E_C A_D, B_B),$ $P(F_C A_D, B_B),$ $P(E_C B_D, A_B),$ $P(F_C B_D, A_B),$ $P(E_C B_D, B_B),$ $P(F_C B_D, B_B)$	$P(B_C A_D, A_B), P(C_C A_D, A_B),$ $P(D_C A_D, A_B), P(B_C A_D, B_B),$ $P(C_C A_D, B_B), P(D_C A_D, B_B),$ $P(B_C B_D, A_B), P(C_C B_D, A_B),$ $P(D_C B_D, A_B), P(B_C B_D, B_B),$ $P(C_C B_D, B_B), P(D_C B_D, B_B)$	$P(H_C A_D, A_B), P(H_C A_D, B_B), P(H_C B_D, A_B),$ $P(H_C B_D, B_B), P(A_C A_D, C_B), P(B_C A_D, C_B),$ $P(C_C A_D, C_B), P(D_C A_D, C_B), P(E_C A_D, C_B),$ $P(F_C A_D, C_B), P(H_C A_D, C_B), P(A_C B_D, C_B),$ $P(B_C B_D, C_B), P(C_C B_D, C_B), P(D_C B_D, C_B),$ $P(E_C B_D, C_B), P(F_C B_D, C_B), P(H_C B_D, C_B),$ $P(A_C C_D, A_B), P(B_C C_D, A_B), P(C_C C_D, A_B),$ $P(D_C C_D, A_B), P(E_C C_D, A_B), P(F_C C_D, A_B),$ $P(H_C C_D, A_B), P(A_C C_D, B_B), P(B_C C_D, B_B),$ $P(C_C C_D, B_B), P(D_C C_D, B_B), P(E_C C_D, B_B),$ $P(F_C C_D, B_B), P(H_C C_D, B_B), P(A_C C_D, C_B),$ $P(B_C C_D, C_B), P(C_C C_D, C_B), P(D_C C_D, C_B),$ $P(E_C C_D, C_B), P(F_C C_D, C_B), P(H_C C_D, C_B)$

За аналогічними міркуваннями скомпоновані формули розрахунку інших показників ефективності ОС. Показник «Ймовірність обману користувача ОС»:

$$P_{u.c} = \sum_j p_j^B, \quad (3)$$

де p_j^B – умовна ймовірність «обману» користувача ОС в j -му варіанті її реакції, для якої в зоні СП має бути представлена реакція E_C або F_C , за умови, що у ДЗК та БЗК були такі варіанти реакції КОС: A_D і A_B або B_D і A_B або A_D і B_B або B_D і B_B .

Перша складова формули (3) – p_1^B має таке обґрунтування: «Обман користувача ОС», коли служба охорони ОКІ отримує від ПДП повідомлення про порушника тип якого розпізнаний неправильно, але координати визначені з необхідною точністю, за умови, що в ПДП від СПВІ отримані повідомлення з неправильно розпізнаним типом порушника в обох зон контролю КОС. Такий варіант реакції, представимо умовною ймовірністю у вигляді:

$$p_1^B = P(E_C | B_D, B_B). \quad (4)$$

Решта умовних ймовірностей для формули (3) наведено в табл. 1.

Показник «Ймовірність того, що завдання ОС виконано частково»:

$$P_{t.ex.p} = \sum_k p_k^C, \quad (5)$$

де p_k^C – умовна ймовірність того, що завдання ОС виконано частково в k -му варіанті реакції, для якої в зоні СП має бути представлена реакція B_C або C_C або D_C , за умови, що у ДЗК та БЗК були такі варіанти реакції КОС: A_D і A_B або B_D і A_B або A_D і B_B або B_D і B_B .

Перша складова формули (5) – p_1^C має таке обґрунтування: «Завдання ОС виконано частково», коли служба охорони ОКІ від ПДП отримує повідомлення про правильно розпізнаного та ідентифікованого порушника, але його поточні координати не визначені з необхідною точністю, за умови, що в ПДП від СПВІ отримані повідомлення з правильно розпізнаним типом порушника в обох зонах контролю КОС. Такий варіант реакції, представимо умовною ймовірністю у вигляді:

$$p_1^C = P(B_C | A_D, A_B). \quad (6)$$

Решта умовних ймовірностей для формули (5) наведено в табл. 1.

Показник «Ймовірність того, що завдання ОС не виконано»:

$$P_{l.n.ex} = \sum_k p_l^D, \quad (7)$$

де p_l^D – умовна ймовірність не виконання завдання ОС в l -му варіанті її реакції, для якої має бути представлена реакція «Порушник не виявлений» в одній або в двох або трьох зонах контролю.

Перша складова формули (7) – p_1^D має таке обґрунтування: «Завдання ОС не виконано», коли

$$P_{t.ex} = P(A_C | A_D, A_B) + P(A_C | A_D, B_B) + P(A_C | B_D, A_B) + P(A_C | B_D, B_B), \quad (9)$$

$$P_{u.c} = P(E_C | A_D, A_B) + P(F_C | A_D, A_B) + P(E_C | A_D, B_B) + P(F_C | A_D, B_B) + P(E_C | B_D, A_B) + P(F_C | B_D, A_B) + P(E_C | B_D, B_B) + P(F_C | B_D, B_B); \quad (10)$$

служба охорони ОКІ від ПДП не отримає повідомлення про виявлення порушника в зоні СП, за умови, що в ПДП від СПВІ отримані повідомлення з правильно розпізнаним типом порушника в обох зон контролю КОС. Такий варіант реакції, представимо умовною ймовірністю у вигляді:

$$p_1^D = P(H_C | A_D, A_B). \quad (8)$$

Решта умовних ймовірностей для формули (7) наведено в табл. 1.

Зауважимо, що сформовані умовні ймовірності для формул (1), (3), (5), (7) представлені в табл. 1 є апіорними ймовірностями, на що треба звернути увагу під час вибору типу математичної моделі реакції системи на перетин порушником зон контролю та її розробленні.

За формулами (1), (3), (5), (7) з використанням даних з таблиці 1 скомпоновані формули для визначення показників ефективності:

$$P_{t.ex.p} = P(B_C | A_D, A_B) + P(C_C | A_D, A_B) + P(D_C | A_D, A_B) + P(B_C | A_D, B_B) + P(C_C | A_D, B_B) + P(D_C | A_D, B_B) + \\ + P(B_C | B_D, A_B) + P(C_C | B_D, A_B) + P(D_C | B_D, A_B) + P(B_C | B_D, B_B) + P(C_C | B_D, B_B) + P(D_C | B_D, B_B); \quad (11)$$

$$P_{t.n.ex} = P(H_C | A_D, A_B) + P(H_C | A_D, B_B) + P(H_C | B_D, A_B) + P(H_C | B_D, B_B) + P(A_C | A_D, C_B) + \\ + P(B_C | A_D, C_B) + P(C_C | A_D, C_B) + P(D_C | A_D, C_B) + \dots + P(B_C | C_D, B_B) + P(C_C | C_D, B_B) + \\ + P(D_C | C_D, B_B) + P(E_C | C_D, B_B) + P(F_C | C_D, B_B) + P(H_C | C_D, B_B) + \dots + P(H_C | C_D, C_B). \quad (12)$$

Розгляд аналітичних виразів для визначення показників ефективності (9) – (12) дає змогу зробити висновок, що для визначення їх складових є доцільним використання дискретно-неперервної стохастичної моделі реакції ОС на перетин порушником трьох зон контролю.

5. Показники функціональності складових охоронної системи

В даному розгляді складовими охоронної системи вважаємо комплекс охоронної сигналізації та безпілотний авіаційний комплекс. Далі подано перелік показників функціональності складових ОС та середні значення інтервалів часу, що характеризують тривалість виконання описаних в розділі 3 процедур. Комплекс охоронної сигналізації в розробленій стохастичній моделі функціональної поведінки ОС представлено наступними показниками функціональності його складових:

- ймовірність виявлення порушника сигналізаційною системою КОС – P_{detUGS} ;
- ймовірність правильного розпізнавання типу порушника сигналізаційною системою КОС – P_{idUGS} ;
- ймовірність успішного доставлення повідомлення про порушника на СПВІ – P_dUGS ;
- середнє значення інтервалу часу від моменту появи порушника в ДЗК (в БЗК) до моменту завершення формування сигналу для процедури розпізнавання його типу, завершення процедури 1 для ДЗК (процедури 4 для БЗК) – $T_{det1} (T_{det2})$.

Безпілотний авіаційний комплекс в розробленій стохастичній моделі функціональної поведінки ОС представлено наступними показниками функціональності його складових:

- ймовірність виявлення порушника БпАК – P_{detUAV} ;
- ймовірність правильного розпізнавання типу

порушника БпАК – P_{idUAV} ;

- ймовірність правильної ідентифікації порушника – P_{desUAV} ;

- ймовірність визначення координат порушника з необхідною точністю – $P_{d.cUAV}$;

- ймовірність успішного доставлення інформації про порушника від ПДП до служби охорони ОКІ – P_dUAV ;

- середнє значення інтервалу часу від моменту появи порушника в зоні СП до моменту його виявлення (завершення процедури 8) – T_{det3} .

6. Стохастична модель функціональної поведінки охоронної системи

Авторами статті запропонована стохастична модель функціональної поведінки ОС, яка відтворює її реакції на перетин порушником трьох зон контролю з використанням технології моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем [12]. Розроблення стохастичної моделі виконано в такій послідовності.

Етап 1. Визначення базових подій реакції ОС.

Для розроблення моделі функціональної поведінки ОС у вигляді графа станів і переходів необхідно визначити базові події (БП), які представляють усі процеси й процедури, що формують варіанти реакції ОС. А також показати зовнішні процеси, з якими взаємодіють складові ОС протягом виконання завдання та сформувати вектор станів, який представлятиме зміну станів згідно реакції зазначеної системи.

Згідно з процедурами, які передбачені алгоритмом функціонування ОС (рисунк 1), складено перелік подій. Ці події представляють початок і закінчення кожної процедури, тому представлені в табл. 2 попарно.

Таблиця 2 – Пари подій, які фіксують початок і закінчення процедур, що формують реакцію ОС на перетин порушником зон контролю

№ з/п	Подія-початок	Подія-закінчення (базова подія)	Середнє значення тривалості процедури	Інтенсивність появи базової події
1	Початок перебування порушника в ДЗК	БП1: Закінчення процедури виявлення порушника в ДЗК	T_{det1}	$\lambda_1 = 1/T_{det1}$
2	Початок процедури розпізнавання типу порушника, виявленого в ДЗК	БП2: Закінчення процедури розпізнавання типу порушника виявленого в ДЗК	$t_{id1} \ll T_{det1}$	$\lambda_{id1} = 1/t_{id1}$
3	Початок процедури доставлення повідомлення про порушника від сигналізаційної системи ДЗК до СПВІ	БП3: Закінчення процедури доставлення повідомлення про порушника від сигналізаційної системи ДЗК до СПВІ	$t_{d1} \ll T_{det1}$	$\lambda_{d1} = 1/t_{d1}$
4	Початок перебування порушника в БЗК	БП4: Закінчення процедури виявлення порушника в БЗК	T_{det2}	$\lambda_2 = 1/T_{det2}$

5	Початок процедури розпізнавання типу порушника, виявленого в БЗК	БП5: Закінчення процедури розпізнавання типу порушника, виявленого в БЗК	$t_{id2} \ll T_{det2}$	$\lambda_{id2} = 1/t_{id2}$
6	Початок процедури доставляння повідомлення про порушника від сигналізаційної системи БЗК до СПВІ	БП6: Закінчення процедури доставляння повідомлення про порушника від сигналізаційної системи БЗК до СПВІ	$t_{d2} \ll T_{det2}$	$\lambda_{d2} = 1/t_{d2}$
7	Початок процедури прийняття рішення про тип порушника в СПВІ за повідомленнями сигналізаційних систем ДЗК і БЗК	БП7: Закінчення процедури прийняття рішення про тип порушника в СПВІ за повідомленнями сигналізаційних систем з ДЗК і БЗК	$t_D \ll T_{det2}$	$\lambda_D = 1/t_D$
8	Початок перебування порушника в зоні СП	БП8: Закінчення процедури виявлення порушника БпАК в зоні СП	T_{det3}	$\lambda_3 = 1/T_{det3}$
9	Початок процедури розпізнавання типу порушника виявленого в зоні СП	БП9: Закінчення процедури розпізнавання типу порушника виявленого в зоні СП	$t_{id3} \ll T_{det3}$	$\lambda_{id3} = 1/t_{id3}$
10	Початок процедури ідентифікації порушника виявленого БпАК	БП10: Закінчення процедури ідентифікації порушника виявленого БпАК	$t_{des} \ll T_{det3}$	$\lambda_{des} = 1/t_{des}$
11	Початок процедури визначення координат порушника з необхідною точністю	БП11: Закінчення процедури визначення координат порушника з необхідною точністю	$t_{d.c} \ll T_{det3}$	$\lambda_{d.c} = 1/t_{d.c}$
12	Початок процедури доставляння повідомлення про порушника від ПДП до служби охорони	БП12: Закінчення процедури доставляння повідомлення про порушника від ПДП до служби охорони	$t_{d3} \ll T_{det3}$	$\lambda_{d3} = 1/t_{d3}$

Проведемо аналіз представлених в табл. 2 базових подій з метою віднесення частини з них до категорії зведених базових подій (ЗвБП). Оскільки тривалості процедур: розпізнавання типу порушника t_{id} , ідентифікації t_{des} , визначення координат $t_{d.c}$ та доставляння повідомлення про порушника t_d є значно меншими від тривалостей процедури виявлення порушника в зонах контролю T_{det1} , T_{det2} , T_{det3} , то в моделі їх значення приймаються рівними нулю. Тому далі події 1, 4, 8 вважатимуться базовими, а події 2, 3, 5 – 7, 9 – 12 зведеними до них відповідно. Виходячи з цього, в розробленій моделі реакції ОС на перетин порушником зон контролю використано наступні БП.

Базова подія 1 “Закінчення процедури виявлення порушників в ДЗК”. З нею зведені: подія “Закінчення процедури розпізнавання типу порушників виявлених в ДЗК” та подія “Закінчення процедури доставляння повідомлень про порушників від ДЗК до СПВІ”. Для цих подій використано позначення ЗвБП2 та ЗвБП3.

Базова подія 4 “Закінчення процедури виявлення порушників в БЗК”. З нею зведені: подія “Закінчення процедури розпізнавання типу порушників виявлених в БЗК”, подія “Закінчення процедури доставляння повідомлень про порушників від БЗК до СПВІ” та подія “Закінчення процедури прийняття рішення про тип порушників виявлених КОС”. Для цих подій використано позначення ЗвБП5, ЗвБП6 та ЗвБП7.

Базова подія 8 “Закінчення процедури виявлення порушників в зоні СП”. З нею зведені: подія “Закінчення процедури розпізнавання типу порушників виявлених БпАК”, подія “Закінчення процедури ідентифікації порушників”, подія “Закінчення процедури визначення координат порушників із необхідною точністю” та подія “Закінчення процедури доставляння повідомлення про порушників від ПДП до служби охорони ОКІ”. Для цих подій використано позначення ЗвБП9, ЗвБП10, ЗвБП11 та ЗвБП12.

Етап 2. Призначення компонент вектора стану стохастичної моделі функціональної поведінки охоронної системи при перетині порушником трьох зон контролю.

Для побудови моделі формується вектор станів, який складається з певної кількості компонент.

Ступінь адекватності моделі, що розробляється, визначає, разом з базовими подіями, кількість призначених компонент. Запропоновано кожен стан ОС описувати вектором, який складається з шістьох компонент:

V1 – показує варіанти реакції КОС в ДЗК після базової події БП1, які формуються урахуванням зведених з нею базових подій ЗвБП2 та ЗвБП3; початкові значення, які приймає ця і всі наступні компоненти подані нижче;

V2 – показує варіанти реакції КОС в БЗК після БП4, які формуються урахуванням зведених з нею базових подій ЗвБП5, ЗвБП6 та ЗвБП7;

V3 – показує варіанти результатів виконання завдання КОС по прийнятому в СПВІ рішення про тип виявленого порушника за повідомленнями СССД встановлених в ДЗК та БЗК (допоміжна компонента);

V4 – показує варіанти реакції БпАК після БП8, які формуються урахуванням зведених з нею ЗвБП9, ЗвБП10, ЗвБП11 та ЗвБП12;

V5 – показує варіанти результатів виконання завдання БпАК за прийнятою на ПДП інформацією (допоміжна компонента);

V6 – показує варіанти результатів виконання завдання ОС за результатами виконання завдань його складовими: КОС в дальній і ближній зонах контролю та БпАК в зоні СП.

Варіанти реакції КОС на перетин порушником ДЗК та БЗК є однотипними, тому компоненти V1 та V2 можуть приймати такі значення:

«1» – коли порушник у ЗК виявлений, його тип розпізнаний правильно, повідомлення до СПВІ доставлено;

«2» – коли порушник у ЗК виявлений, але його тип розпізнаний не правильно, повідомлення до СПВІ доставлено;

«3» – коли порушник у ЗК не виявлений.

Компонента V4 представляє реакції БпАК на перетин порушником зони СП, її можливі значення:

«1» – коли порушник в зоні СП за допомогою БпАК виявлений; його тип розпізнаний правильно; правильно ідентифікований; координати визначені із необхідною точністю; повідомлення з інформацією про порушника до служби охорони ОКІ доставлено;

«2» – коли порушник в зоні СП за допомогою

БпАК виявлений; тип порушника розпізнаний правильно; правильно ідентифікований; але координати порушника не визначені із необхідною точністю; повідомлення з інформацією про порушника до служби охорони ОКІ доставлено;

«3» – коли порушник в зоні СП за допомогою БпАК виявлений; тип порушника розпізнаний правильно; але не правильно ідентифікований; координати порушника визначені із необхідною точністю; повідомлення з інформацією про порушника до служби охорони ОКІ доставлено;

«4» – коли порушник в зоні СП за допомогою БпАК виявлений; тип порушника розпізнаний правильно; але не правильно ідентифікований; координати не визначені з необхідною точністю; повідомлення з інформацією про порушника до служби охорони ОКІ доставлено;

«5» – коли порушник в зоні СП за допомогою БпАК виявлений; але тип порушника розпізнаний неправильно; координати визначені із необхідною точністю; повідомлення з інформацією про порушника до служби охорони ОКІ доставлено;

«6» – коли порушник в зоні СП за допомогою БпАК виявлений; але тип порушника розпізнаний неправильно, координати не визначені із необхідною точністю; повідомлення з інформацією про порушника до служби охорони ОКІ доставлено;

«7» – коли порушник в зоні СП за допомогою БпАК не виявлений.

Значення компонент V3, V5 та V6:

«1» – якщо завдання КОС, завдання БпАК і відповідно завдання ОС виконано;

«2» – якщо результатом роботи КОС, БпАК і відповідно ОС є «обман користувача»;

«3» – якщо завдання КОС, завдання БпАК і відповідно завдання ОС виконано частково;

«4» – якщо завдання КОС, завдання БпАК і відповідно завдання ОС не виконано.

Зауважимо, що у початковому стані значення компонент V1, V2, V3, V4, V5, V6 дорівнюють 0.

Етап 3. Розроблення моделі функціональної поведінки ОС у вигляді графа станів і переходів з використанням базових подій та вектора станів.

У відповідності до представленого на рис. 1 процесу, що відтворює реакції ОС на перетин порушником трьох зон контролю, та представленими в табл. 2 актуальними для представлення в моделі парами подій, які фіксують

початок і закінчення процедур, що формують реакції ОС на перетин порушниками зон контролю, розробляється граф станів та переходів.

Розроблення графа станів та переходів виконується в такій послідовності (результати виконання кроків занесені в табл. 3):

Крок 1. Встановлюємо початковий (перший) стан графа (ПС). Цей стан визначають початкові значення компонент вектора станів: V1:=0, V2:=0, V3:=0, V4:=0, V5:=0, V6:=0.

Крок 2. Розглядаємо стан 1, для якого є актуальними базова подія БП1 та зведені з нею ЗвБП2 і ЗвБП3, і які дають три альтернативні продовження випадкового процесу.

Перше альтернативне продовження є наслідком успішних завершень процедури виявлення порушників в ДЗК (БП1) і процедури розпізнавання їх типу (ЗвБП2), яке в графі станів представлене переходом в наступний стан з ймовірністю: $P_{det} \cdot P_{id}$. Ця альтернатива спричиняє зміну компоненти V1 вектора станів: V1:=1. Отримано новий стан 2. Фіксуємо перехід з стану 1 в стан 2; формула розрахунку інтенсивності такого переходу (ФРП) має вигляд: $\lambda_1 \cdot P_{det} \cdot P_{id}$.

Друге альтернативне продовження є наслідком успішних завершень процедури виявлення порушників у ДЗК (БП1) і не успішного завершення процедури розпізнавання їх типу (ЗвБП2), яке в графі станів представлене переходом в наступний стан з ймовірністю: $P_{det}(1 - P_{id})$. Ця альтернатива спричиняє зміну компоненти V1 вектора станів: V1:=2. Отримано новий стан 3. Фіксуємо перехід з стану 1 в стан 3; ФРП має вигляд: $\lambda_1 \cdot P_{det}(1 - P_{id})$.

Третє альтернативне продовження є наслідком неуспішних завершень процедури виявлення порушників у ДЗК (БП1), яке в графі станів представлене переходом в наступний стан з ймовірністю: $(1 - P_{det})$. Ця альтернатива спричиняє зміну компоненти V1 вектора станів: V1:=3. Отримано новий стан 4. Фіксуємо перехід з стану 1 в стан 4; ФРП має вигляд: $\lambda_1 \cdot (1 - P_{det})$.

Кроки 3 – 5. Аналогічно виконується розгляд наступних 2, 3 і 4 станів, які визначаються після розгляду стану 1, а саме кроків з третього по п'ятий. Виконання цих кроків дає нові стани графа з 5 по 13.

Таблиця 3 – Модель функціональної поведінки охоронної системи, у складі КОС та БпАК, на перетин порушниками трьох зон контролю у вигляді графа станів та переходів

Крок №	Стан і актуальн а БП	Імовірності альтернативних продовжень процесів	Вектор стану						№ стан у	Перехід з стану в стан	ФРП
			V1	V2	V3	V4	V5	V6			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ПС	-	0	0	0	0	0	0	1	-	-
2	1БП1 (ЗвБП2, ЗвБП3)	$P_{det1} \cdot P_{id1}$	1	0	0	0	0	0	2	1→2	$\lambda_1 \cdot P_{det1} \cdot P_{id1}$
		$P_{det1} (1 - P_{id1})$	2	0	0	0	0	0	3	1→3	$\lambda_1 \cdot P_{det1} (1 - P_{id1})$
		$(1 - P_{det1})$	3	0	0	0	0	0	4	1→4	$\lambda_1 (1 - P_{det1})$
3	2БП4	$P_{det2} \cdot P_{id2}$	1	1	1	0	0	0	5	2→5	$\lambda_2 \cdot P_{det2} \cdot P_{id2}$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	(ЗвБП5, ЗвБП6, ЗвБП7)	$P_{\text{det } 2} (1 - P_{\text{id } 2})$	1	2	3	0	0	0	6	2→6	$\lambda_2 \cdot P_{\text{det } 2} (1 - P_{\text{id } 2})$
		$(1 - P_{\text{det } 2})$	1	3	4	0	0	0	7	2→7	$\lambda_2 (1 - P_{\text{det } 2})$
4	ЗБП4 (ЗвБП5, ЗвБП6, ЗвБП7)	$P_{\text{det } 2} \cdot P_{\text{id } 2}$	2	1	3	0	0	0	8	3→8	$\lambda_2 \cdot P_{\text{det } 2} \cdot P_{\text{id } 2}$
		$P_{\text{det } 2} (1 - P_{\text{id } 2})$	2	2	2	0	0	0	9	3→9	$\lambda_2 \cdot P_{\text{det } 2} (1 - P_{\text{id } 2})$
		$(1 - P_{\text{det } 2})$	2	3	4	0	0	0	10	3→10	$\lambda_2 (1 - P_{\text{det } 2})$
5	4БП4 (ЗвБП5, ЗвБП6, ЗвБП7)	$P_{\text{det } 2} \cdot P_{\text{id } 2}$	3	1	4	0	0	0	11	4→11	$\lambda_2 \cdot P_{\text{det } 2} \cdot P_{\text{id } 2}$
		$P_{\text{det } 2} (1 - P_{\text{id } 2})$	3	2	4	0	0	0	12	4→12	$\lambda_2 \cdot P_{\text{det } 2} (1 - P_{\text{id } 2})$
		$(1 - P_{\text{det } 2})$	3	3	4	0	0	0	13	4→13	$\lambda_2 (1 - P_{\text{det } 2})$
6	(ЗвБП9, ЗвБП10, ЗвБП11, ЗвБП12)	$P_{\text{det } 3} \cdot P_{\text{id } 3} \cdot P_{\text{dec}} \cdot P_{\text{d.c}}$	1	1	1	1	1	1	14	5→14	$\lambda_3 \cdot P_{\text{det } 3} \cdot P_{\text{id } 3} \cdot P_{\text{dec}} \cdot P_{\text{d.c}}$
		$P_{\text{det } 3} \cdot P_{\text{id } 3} \cdot P_{\text{dec}} (1 - P_{\text{d.c}})$	1	1	1	2	3	3	15	5→15	$\lambda_3 \cdot P_{\text{det } 3} \cdot P_{\text{id } 3} \cdot P_{\text{dec}} (1 - P_{\text{d.c}})$
		$P_{\text{det } 3} \cdot P_{\text{id } 3} (1 - P_{\text{dec}}) P_{\text{d.c}}$	1	1	1	3	3	3	16	5→16	$\lambda_3 \cdot P_{\text{det } 3} \cdot P_{\text{id } 3} (1 - P_{\text{dec}}) P_{\text{d.c}}$
		$P_{\text{det } 3} \cdot P_{\text{id } 3} (1 - P_{\text{dec}}) (1 - P_{\text{d.c}})$	1	1	1	4	3	3	17	5→17	$\lambda_3 \cdot P_{\text{det } 3} \cdot P_{\text{id } 3} (1 - P_{\text{dec}}) (1 - P_{\text{d.c}})$
		$P_{\text{det } 3} (1 - P_{\text{id } 3}) P_{\text{d.c}}$	1	1	1	5	2	3	18	5→18	$\lambda_3 \cdot P_{\text{det } 3} (1 - P_{\text{id } 3}) P_{\text{d.c}}$
		$P_{\text{det } 3} (1 - P_{\text{id } 3}) (1 - P_{\text{d.c}})$	1	1	1	6	2	3	19	5→19	$\lambda_3 \cdot P_{\text{det } 3} (1 - P_{\text{id } 3}) (1 - P_{\text{d.c}})$
		$(1 - P_{\text{det } 3})$	1	1	1	7	4	4	20	5→20	$\lambda_3 (1 - P_{\text{det } 3})$
...											
14	(ЗвБП9, ЗвБП10)	$P_{\text{det } 3} \cdot P_{\text{id } 3} \cdot P_{\text{dec}} \cdot P_{\text{d.c}}$	3	3	4	1	1	4	70	13→70	$\lambda_3 \cdot P_{\text{det } 3} \cdot P_{\text{id } 3} \cdot P_{\text{dec}} \cdot P_{\text{d.c}}$
		$P_{\text{det } 3} \cdot P_{\text{id } 3} \cdot P_{\text{dec}} (1 - P_{\text{d.c}})$	3	3	4	2	3	4	71	13→71	$\lambda_3 \cdot P_{\text{det } 3} \cdot P_{\text{id } 3} \cdot P_{\text{dec}} (1 - P_{\text{d.c}})$
		$P_{\text{det } 3} \cdot P_{\text{id } 3} (1 - P_{\text{dec}}) P_{\text{d.c}}$	3	3	4	3	3	4	72	13→72	$\lambda_3 \cdot P_{\text{det } 3} \cdot P_{\text{id } 3} (1 - P_{\text{dec}}) P_{\text{d.c}}$
		$P_{\text{det } 3} \cdot P_{\text{id } 3} (1 - P_{\text{dec}}) (1 - P_{\text{d.c}})$	3	3	4	4	3	4	73	13→73	$\lambda_3 \cdot P_{\text{det } 3} \cdot P_{\text{id } 3} (1 - P_{\text{dec}}) (1 - P_{\text{d.c}})$
		$P_{\text{det } 3} (1 - P_{\text{id } 3}) P_{\text{d.c}}$	3	3	4	5	2	4	74	13→74	$\lambda_3 \cdot P_{\text{det } 3} (1 - P_{\text{id } 3}) P_{\text{d.c}}$
		$P_{\text{det } 3} (1 - P_{\text{id } 3}) (1 - P_{\text{d.c}})$	3	3	4	6	2	4	75	13→75	$\lambda_3 \cdot P_{\text{det } 3} (1 - P_{\text{id } 3}) (1 - P_{\text{d.c}})$
		$(1 - P_{\text{det } 3})$	3	3	4	7	4	4	76	13→76	$\lambda_3 (1 - P_{\text{det } 3})$

Крок 6. Розглядаємо стан 5, для якого є актуальними базова подія БП8 та зведені з нею ЗвБП9, ЗвБП10, ЗвБП11 і ЗвБП12, і які дають сім альтернативних продовжень випадкового процесу.

Перше альтернативне продовження є наслідком успішних завершень процедури виявлення порушників в зоні СП (БП8), розпізнавання (підтвердження) типу порушників виявлених БпАК (ЗвБП9), їх ідентифікації (ЗвБП10) і визначення координат з необхідною точністю (ЗвБП11), яке в графі станів представлено переходом в наступний стан з ймовірністю: $P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} \cdot P_{d.c}$.

Ця альтернатива спричиняє зміну компонент вектора станів: $V4:=1$, $V5:=1$, $V6:=1$. Отримано новий стан 14. Фіксуємо перехід з стану 5 в стан 14; ФРП має вигляд: $\lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} \cdot P_{d.c}$.

Друге альтернативне продовження є наслідком успішних завершень процедури виявлення БпАК порушників в зоні СП (БП8), розпізнавання типу порушників виявлених БпАК (ЗвБП9), їх ідентифікації (ЗвБП10) і не успішних завершень процедури визначення координат із необхідною точністю (ЗвБП11), яке в графі станів представлено переходом в наступний стан з ймовірністю: $P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} (1 - P_{d.c})$.

Ця альтернатива спричиняє зміну компонент вектора станів: $V4:=2$, $V5:=3$, $V6:=3$. Отримано новий стан 15. Фіксуємо перехід з стану 5 в стан 15;

ФРП має вигляд: $\lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} (1 - P_{d.c})$.

Третє альтернативне продовження є наслідком успішних завершень процедури виявлення БпАК порушників в зоні СП (БП8), розпізнавання їх типу (ЗвБП9), визначення їх координат з необхідною точністю (ЗвБП11) і не успішних завершень процедури ідентифікації порушників (ЗвБП10), яке в графі станів представлено переходом в наступний стан з ймовірністю: $P_{det3} \cdot P_{id3} (1 - P_{dec}) P_{d.c}$.

Ця альтернатива спричиняє зміну компонент вектора станів: $V4:=3$, $V5:=3$, $V6:=3$. Отримано новий стан 16. Фіксуємо перехід з стану 5 в стан 16; ФРП має вигляд: $\lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} (1 - P_{dec}) P_{d.c}$.

Четверте альтернативне продовження є наслідком успішних завершень процедур виявлення БпАК порушників в зоні СП (БП8) та розпізнавання їх типу (ЗвБП9) і не успішних завершень процедур ідентифікації порушників (ЗвБП10) та визначення їх координат з необхідною точністю (ЗвБП11), яке в графі станів представлено переходом в наступний стан з ймовірністю: $P_{det3} \cdot P_{id3} (1 - P_{dec}) (1 - P_{d.c})$.

Ця альтернатива спричиняє зміну компонент вектора станів: $V4:=4$, $V5:=3$, $V6:=3$. Отримано новий стан 17. Фіксуємо перехід з стану 5 в стан 17; ФРП має вигляд: $\lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} (1 - P_{dec}) (1 - P_{d.c})$.

П'яте альтернативне продовження є наслідком успішних завершень процедур виявлення БпАК порушників в зоні СП (БП8) та процедур

визначення їх координат із необхідною точністю (ЗвБП11) і не успішних завершень процедури розпізнавання типу порушників (ЗвБП9), яке в графі станів представлено переходом в наступний стан з ймовірністю $P_{det3}(1-P_{id3})P_{d.c}$. Ця альтернатива спричиняє змі-

ну компонент вектора станів: $V4:=5$, $V5:=2$, $V6:=3$. Отримано новий стан 18. Фіксуємо перехід з стану 5 в стан 18; ФРП має вигляд: $\lambda_3 \cdot P_{det3}(1-P_{id3})P_{d.c}$.

Шосте альтернативне продовження є наслідком успішних завершень процедури виявлення БпАК порушників в зоні СП (БП8) і не успішних завершень процедур розпізнавання типу порушників виявлених БпАК (ЗвБП9) та визначення їх диферент із необхідною точністю (ЗвБП11), яке в графі станів представлено переходом в наступний стан з ймовірністю: $P_{det3}(1-P_{id3})(1-P_{d.c})$.

Ця альтернатива спричиняє зміну компонент вектора станів: $V4:=6$, $V5:=2$, $V6:=3$. Отримано новий стан 19. Фіксуємо перехід з стану 5 в стан 19; ФРП має вигляд: $\lambda_3 \cdot P_{det3}(1-P_{id3})(1-P_{d.c})$.

Сьоме альтернативне продовження є наслідком не успішних завершень процедури виявлення порушників в зоні СП (БП8), яке в графі станів представлено переходом в наступний стан з ймовірністю: $(1-P_{det3})$. Ця альтернатива спричиняє зміну компонент вектора станів: $V4:=7$, $V5:=4$, $V6:=4$. Отримано новий стан 20. Фіксуємо перехід з стану 5 в стан 20; ФРП має вигляд: $\lambda_3(1-P_{det3})$.

Аналогічно розглянуто стани з 6-го по 13-й і виконані кроки з 7-го по 14-й. Отриманий граф станів і переходів має 76 станів.

Етап 4. Формування дискретно-неперервної стохастичної моделі ОС у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена.

Стохастична модель функціональної поведінки ОС на перетин порушниками трьох зон контролю, при встановленні КОС у дальній та ближній зонах контролю та використанні БпАК для забезпечення функціонування зони СП, зображена у вигляді системи лінійних однорідних диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\begin{aligned}
\frac{dQ_1(t)}{dt} &= -(\lambda_1 \cdot P_{det1} \cdot P_{id1} + \lambda_1 \cdot P_{det1}(1 - P_{id1}) + \lambda_1(1 - P_{det1})) \cdot Q_1(t); \\
\frac{dQ_2(t)}{dt} &= \lambda_1 \cdot P_{det1} \cdot P_{id1} \cdot Q_1(t) - (\lambda_2 \cdot P_{det2} \cdot P_{id2} + \lambda_2 \cdot P_{det2}(1 - P_{id2}) + \lambda_2(1 - P_{det2})) \cdot Q_2(t); \\
\frac{dQ_3(t)}{dt} &= \lambda_1 \cdot P_{det1}(1 - P_{id1}) \cdot Q_1(t) - (\lambda_2 \cdot P_{det2} \cdot P_{id2} + \lambda_2 \cdot P_{det2}(1 - P_{id2}) + \lambda_2(1 - P_{det2})) \cdot Q_3(t); \\
\frac{dQ_4(t)}{dt} &= \lambda_1(1 - P_{det1}) \cdot Q_1(t) - (\lambda_2 \cdot P_{det2} \cdot P_{id2} + \lambda_2 \cdot P_{det2}(1 - P_{id2}) + \lambda_2(1 - P_{det2})) \cdot Q_4(t); \\
\frac{dQ_5(t)}{dt} &= \lambda_2 \cdot P_{det2} \cdot P_{id2} \cdot Q_2(t) - X_3 \cdot Q_5(t); \\
\frac{dQ_6(t)}{dt} &= \lambda_2 \cdot P_{det2}(1 - P_{id2}) \cdot Q_2(t) - X_3 \cdot Q_6(t); \\
\frac{dQ_7(t)}{dt} &= \lambda_2(1 - P_{det2}) \cdot Q_2(t) - X_3 \cdot Q_7(t); \\
&\dots \\
\frac{dQ_{13}(t)}{dt} &= \lambda_2(1 - P_{det2}) \cdot Q_4(t) - X_3 \cdot Q_{13}(t); \\
\frac{dQ_{14}(t)}{dt} &= \lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} \cdot P_{d.c} \cdot Q_5(t); \\
\frac{dQ_{15}(t)}{dt} &= \lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec}(1 - P_{d.c}) \cdot Q_5(t); \\
&\dots \\
\frac{dQ_{75}(t)}{dt} &= \lambda_3 \cdot P_{det3}(1 - P_{id3})(1 - P_{d.c}) \cdot Q_{13}(t); \\
\frac{dQ_{76}(t)}{dt} &= \lambda_3(1 - P_{det3}) \cdot Q_{13}(t),
\end{aligned} \tag{13}$$

де $Q_i(t)$ – імовірність перебування в i -му стані графа на інтервалі часу t ;

$$\begin{aligned}
X_3 &= \lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} \cdot P_{d.c} + \lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec}(1 - P_{d.c}) + \lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3}(1 - P_{dec}) \cdot P_{d.c} + \\
&+ \lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3}(1 - P_{dec})(1 - P_{d.c}) + \lambda_3 \cdot P_{det3}(1 - P_{id3}) \cdot P_{d.c} + \lambda_3 \cdot P_{det3}(1 - P_{id3})(1 - P_{d.c}) + \lambda_3(1 - P_{det3}).
\end{aligned}$$

Розв'язання системи диференціальних рівнянь ефективності запропонованої ОС (рис. 1) згідно (13) дає змогу розрахувати значення показників виразів (9)–(12) за такими формулами:

$$P_{t.ex} = Q_{14}(t) + Q_{21}(t) + Q_{35}(t) + Q_{42}(t); \tag{14}$$

$$P_{u.c} = Q_{18}(t) + Q_{19}(t) + Q_{25}(t) + Q_{26}(t) + Q_{39}(t) + Q_{40}(t) + Q_{46}(t) + Q_{47}(t); \tag{15}$$

$$P_{t.ex.p} = \sum_{i=15}^{17} Q_i(t) + \sum_{i=22}^{24} Q_i(t) + \sum_{i=36}^{38} Q_i(t) + \sum_{i=43}^{45} Q_i(t); \tag{16}$$

$$P_{t.n.ex} = Q_{20}(t) + \sum_{i=27}^{34} Q_i(t) + Q_{41}(t) + \sum_{i=48}^{76} Q_i(t). \tag{17}$$

Еман 5. Складання переліку актуальних експериментів та їх проведення для валідації розробленої дискретно-неперервної стохастичної моделі.

7. Експерименти

Для валідації розробленої дискретно-неперервної стохастичної моделі проведено експериментальні дослідження обраних залежностей, характер змін яких можна передбачити. Такими залежностями є залежності показників ефективності ОС від значень показників функціональності його складових.

Нагадаємо, що показниками функціональності складових КОС є: імовірність виявлення порушника (P_{det1}) та імовірність правильного розпізнавання

його типу (P_{id1}). А показниками функціональності складових БпАК: імовірність виявлення порушника (P_{det2}), імовірність правильного розпізнавання його типу (P_{id2}), імовірність успішної ідентифікації (P_{dec}) та імовірність визначення координат порушника з необхідною точністю ($P_{d.c}$).

У валідаційних експериментах, значення всіх показників функціональності складових КОС і БпАК прийняті однаковими. Тому на рисунках 3, 4, 5 і 6 показники функціональності всіх складових КОС отримали позначення P_{UGS} , а показники функціональності всіх складових БпАК – P_{UAV} .

Експеримент №1. Дослідження залежності значень показника ефективності ОС «Ймовірність того, що завдання ОС виконано» – $P_{t.ex}$, від зростання значень показників функціональності її складових.

Передбачаємо, що при зростанні значень ймовірностей P_{UGS} і P_{UAV} , значення показника «Ймовірність того, що завдання ОС виконано» ($P_{t.ex}$) також буде зростати. На рис. 3, а представлена залежність, отримана на розробленій моделі.

Експеримент №2. Дослідження залежності значень показника ефективності ОС «Ймовірність обману користувача ОС» ($P_{u.c}$) від зростання значень показників функціональності його складових: КОС (P_{UGS}) та БпАК (P_{UAV}).

Передбачаємо, що показник «Ймовірність обману користувача ОС» буде мати максимальне значення, коли значення показників функціональності складових системи P_{UGS} і P_{UAV} , знаходяться на інтервалі 0,5-0,7. На рис. 3, б представлена залежність, отримана на розробленій моделі.

Експеримент №3. Дослідження залежності значень показника ефективності ОС «Ймовірність того, що завдання ОС виконано частково» ($P_{t.ex.p}$) від зростання значень показників функціональності його складових: КОС (P_{UGS}) та БпАК (P_{UAV}).

Передбачаємо, що показник «Ймовірність того, що завдання ОС виконано частково» буде мати максимальне значення, коли значення показників функціональності складових системи P_{UGS} і P_{UAV} , знаходяться на інтервалі 0,6-0,8. На рис. 3, в

представлена залежність, отримана на розробленій моделі.

Експеримент №4. Дослідження залежності значень показника ефективності ОС «Ймовірність того, що завдання ОС не виконано» ($P_{t.n.ex}$) від зростання значень показників функціональності його складових: КОС (P_{UGS}) та БпАК (P_{UAV}).

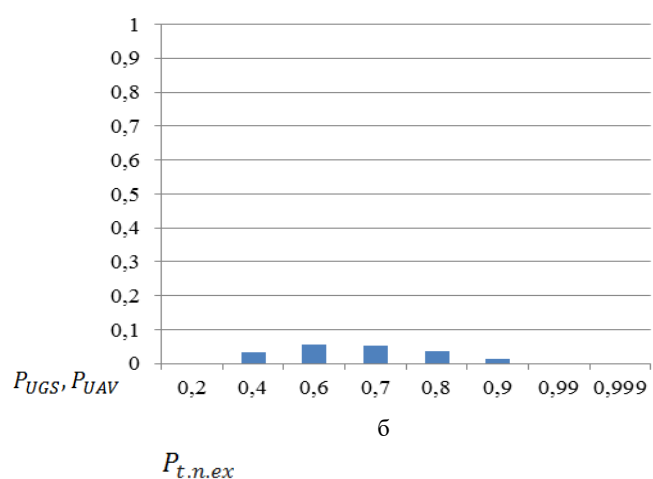
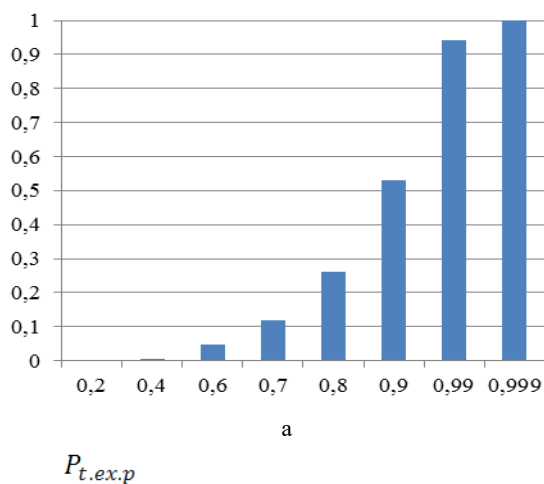
Передбачаємо, що при зростанні значень ймовірностей P_{UGS} і P_{UAV} , значення показника «Ймовірність того, що завдання ОС не виконано» – $P_{t.n.ex}$ буде зменшуватись. На рис. 3, г представлена залежність, отримана на розробленій моделі.

Зауважимо, що з практичної точки зору розглядати залежності показників ефективності ОС для значень P_{UGS} і P_{UAV} менше 0,5 не доцільно, але є необхідним для висновків за результатами валідації моделі.

Результати всіх валідаційних експериментів, показані на рис. 3, дають право зробити висновок, що характер зміни розрахованих кількісних залежностей показників ефективності ОС від показників функціональності його складових відповідає передбаченим якісним змінам цих залежностей.

Проведені експерименти з використанням розробленої дискретно-неперервної стохастичної моделі функціональної поведінки ОС дають підстави вважати, що результати, які будуть отримані під час подальших експериментальних досліджень є достовірними.

$P_{u.c}$



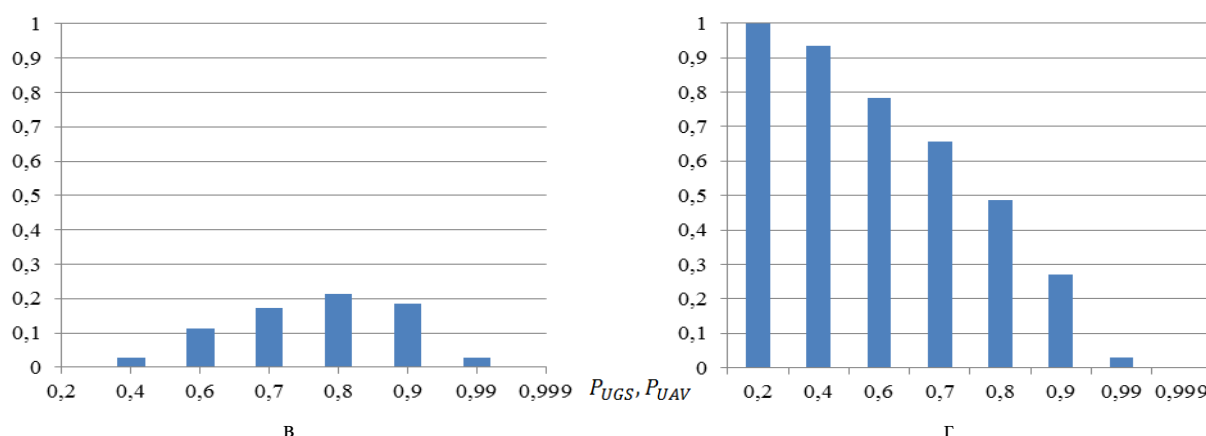


Рис. 3. Залежність значень показників $P_{t.ex}$ (а), $P_{u.c}$ (б), $P_{t.ex.p}$ (в) та $P_{t.n.ex}$ (г) від значень показників P_{UGS} і P_{UAV} (Fig. 3. Dependence of indicators values $P_{t.ex}$ (a), $P_{u.c}$ (б), $P_{t.ex.p}$ (в) & $P_{t.n.ex}$ (г) from the values of indicators P_{UGS} & P_{UAV})

8. Результати

Для дослідження потенційної ефективності реалізації запропонованої охоронної системи проведені віртуальні експерименти за її трьома варіантами. *Варіант №1:* ОС у складі розвідувально-сигналізаційного комплексу (РСК) ІК18 «Реалія» [10] та БпАК типу RQ-11 «Raven» [17]. *Варіант №2:* ОС у складі сучасного РСК типу «Classic 2000» [10] та БпАК поля бою [17]. *Варіант №3:* ОС у складі РСК, значення показників функціональності якого обґрунтовані з урахуванням його спільного застосування з перспективним БпАК та саме БпАК поля бою [18].

Отримані результати віртуальних експериментів на розробленій стохастичній моделі для трьох варіантів ОС представлені в табл. 4 та на рис. 4. Аналіз представлених на рис. 7 результатів віртуальних експериментів для порівняння ефективності ОС трьох варіантів її створення показує:

1. Створення охоронної системи у складі існуючих (застарілих) комплексів (варіант №1) не доцільно, оскільки перспективні значення показника ефективності «Ймовірність того, що завдання ОС виконано» не

перевищують 0,2, що унеможливило б практичне застосування ОС для охорони об'єктів критичної інфраструктури.

2. Створення охоронної системи у складі існуючих сучасних комплексів, які є на озброєнні провідних у технічному відношенні країн світу (варіант №2), є прийнятним, оскільки сума значень показників ефективності «Ймовірність того, що завдання ОС виконано» та «Ймовірність того, що завдання ОС виконано частково» досягає 0,6. Разом з тим, на практичне застосування такої системи буде суттєво впливати значення показника «Ймовірність того, що завдання ОС не виконано», що становить до 0,4.

3. Проектування перспективної охоронної системи (варіант 3) із значеннями показників функціональності її складових, представленими в табл. 4, дозволяє досягти значень показників ефективності системи в цілому прийнятних для її практичного застосування як охоронної системи об'єктів критичної інфраструктури. Розраховане значення показника ефективності такої системи «Ймовірність того, що завдання ОС не виконано» не перевищує 0,2.

Таблиця 4 – Вхідні дані та результати віртуальних експериментів на розробленій стохастичній моделі функціональної поведінки охоронних систем під час перетину порушником трьох зон контролю

Варіант ОС	Значення показників функціональності складових ОС						Значення показників ефективності ОС			
	КОС		БпАК							
	P_{det1}	P_{id1}	P_{det2}	P_{id2}	P_{dec}	$P_{d.c}$	$P_{t.ex}$	$P_{u.c}$	$P_{t.ex.p}$	$P_{t.n.ex}$
Варіант №1	0,7	0,6	0,7	0,8	0,7	0,9	0,173	0,044	0,126	0,657
Варіант №2	0,85	0,75	0,8	0,9	0,8	0,95	0,395	0,025	0,157	0,422
Варіант №3	0,95	0,9	0,9	0,9	0,8	0,95	0,556	0,022	0,234	0,188

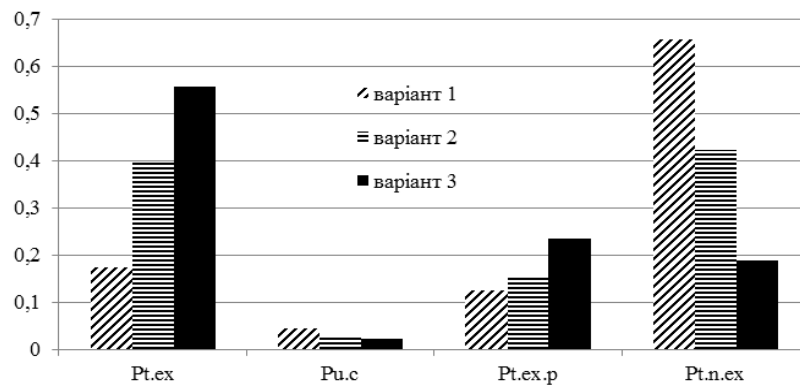


Рис. 4. Значення показників ефективності охоронної системи для визначених варіантів її реалізації
(Fig. 4. The value of indicators of the effectiveness of the security system for certain options for its implementation)

Висновки

Представлена в статті стохастична модель функціональної поведінки, що призначена для розв'язання задач функціонального синтезу охоронної системи у складі комплексу охоронної сигналізації та безпілотного авіаційного комплексу, є частиною інформаційної технології проектування охоронних системи об'єктів критичної інфраструктури. Модель відтворює реакції складових охоронної системи на послідовний перетин порушниками трьох зон контролю під час виконання завдань з охорони об'єктів критичної інфраструктури. Реакції комплексу охоронної сигналізації відтворюють перетин порушниками встановлених дальньої та ближньої зон контролю. Реакції безпілотного авіаційного комплексу є

продовженням реакцій комплексу охоронної сигналізації та відтворюють виявлення і супроводження порушників у розрахованій третій зоні контролю.

Оснащення служб охоронною системою нового зразка забезпечить економію сил і засобів, що необхідні при виконанні завдань з охорони об'єктів критичної інфраструктури. Така охоронна система може бути використана для цілевказання іншим силам і засобам охорони, які мають більш широкі можливості; для забезпечення охорони військових і важливих цивільних об'єктів від терористичних та кримінальних атак, проведення диверсій.

Напрямок подальших досліджень є удосконалення надійніших моделей авіоники БпАК та його складових з урахуванням застосування комплексу в складі перспективної охоронної системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Garcia M. L. Design and evaluation of physical protection systems / M. L. Garcia. – USA: Sandia Corporation, 2007, 337 p.
- Unmanned systems integrated roadmap 2017–2042 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.defensedaily.com/wp-content/uploads/post_attachment/206477.pdf.
- DeGarmo M. Issues Concerning Integration of Unmanned Aerial Vehicles in Civil Airspace / M. DeGarmo. – Virginia : Center for Advanced Aviation System Development McLean, 2004. – 92 p.
- Sleeve G.E. The application of unattended ground sensors to stationary targets, in peace and wartime applications and technical issues for unattended ground sensors / G.E. Sleeve, S. Peglow, R. Hamrick // SPIE. – 1997. – Vol. 3081. – P. 21–29.
- Мосалев В. Системы наблюдения за полем боя на базе разведывательно-сигнализационных приборов / В. Мосалев // Зарубежное военное обозрение. – 2000. – № 2. – С. 21–27.
- Andrushchenko V. Analysis of modern capabilities and perspectives of the technology for seismoacoustic identification of intruder of the protected object perimeter / Andrushchenko V., Syrotenko P., Bugrii V. – Kyiv: T.G. Shevchenko National University, Kyiv, Ukraine, 2015 – P. 6–12.
- Eyes of the Army. The Army Roadmap for UAS 2010–2035. Army UAS CoE Staff. U. S. Army, 2010. – 140 p.
- Пашук Ю. М. Тактичні безпілотні авіаційні комплекси: можливості та обмеження у застосуванні / Ю. М. Пашук, Ю. П. Сальник // Наука і техніка Повітряних Сил ЗС України, 2015. – № 1(18). – С. 23–28.
- Харченко В. С. Система послеаварийного мониторинга АЭС с использованием беспилотных летательных аппаратов: модели надежности / В. С. Харченко, М. А. Ястребенецкий, Г. В. Фесенко та інші. // Ядерна та радіаційна безпека, 2017. – № 4 (76). – С. 50–54.
- Звежинский С. С. Классификации, особенности и информационно-измерительные модели средств обнаружения [Електронний ресурс] / С. С. Звежинский, В. А. Иванов, В. А. Рудниченко // Бюро научно-технической информации, 2008. Режим доступа: <http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=869&lvl=19.01.02>.
- Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М. : Наука, 1978. – 399 с.
- Волочий Б. Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем / Б. Ю. Волочий. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2004. – 220 с.
- Vollmerhausen R. H. The targeting task performance metric [Електронний ресурс] / R. H. Vollmerhausen, Ed. Jacobs. Technical report. AMSEL-NV-TR-230. Rev. 20, 2004. – 126 p. – Режим доступу: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/ADA422493.xhtml>.
- Волочий Б. Оцінка можливостей комплексу охоронної сигналізації з різною кількістю сейсмічних датчиків біля зони контролю / Б. Волочий, М. Змисний, В. Онищенко, та інші. // Дніпро : Системи та технології, 2019. – № 1(57). – С. 47–67. – DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2019-1-57-4>.

15. Salnyk Yu. Stochastic model of the reaction the unattended ground sensor system based on {3+3} scheme / Yu. Salnyk, B. Volochiy, V. Onishchenko // Proceedings of 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2020), Lviv-Slavske, Ukraine, February 25–29.2020. Paper ID 148. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235482>.
16. Salnyk Y. Mini-UAV flight and payload automated control system / Yu. Salnyk, Yu. Pashchuk, I. Matala // Львів: Військово-технічний збірник НАСВ, 2013. – № 2(9). – С. 90–94.
17. Freeman P. Actuation failure modes and effects analysis for a small UAV / P. Freeman, G. Balas // American Control Conference. USA, 2014. – P. 1292–1297. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ACC.2014.6859482>.
18. Беспилотные авиационные комплексы: методики сравнительной оценки боевых возможностей / М. М. Митрахович, В. И. Силков, А. В. Самков [и др.] под ред. В. И. Силкова. – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2012. – 302 с.

REFERENCES

1. Garcia, M.L. (2007), Design and evaluation of physical protection systems, Second Edition, Sandia Corporation, USA, 337 p.
2. (2017), *Unmanned systems integrated roadmap 2017–2042*, available at: https://www.defensedaily.com/wp-content/uploads/post_attachment/206477.pdf.
3. De Garmo, M. (2004), *Issues Concerning Integration of Unmanned Aerial Vehicles in Civil Airspace*, Center for Advanced Aviation System Development McLean, Virginia, 92 p.
4. Sleefe, G.E., Peglow, S. & Hamrick R. (1997), “The application of unattended ground sensors to stationary targets, in peace and wartime applications and technical issues for unattended ground sensors”, *SPIE*, vol. 3081, pp. 21–29.
5. Mosalev, V. (2000), “Battlefield surveillance systems based on reconnaissance and alarm devices”, *ZVO*, No. 2, pp. 21–27.
6. Andrushchenko, V., Syrotenko, P. & Bugrii, V. (2015), *Analysis of modern capabilities and perspectives of the technology for seismoacoustic identification of intruder of the protected object perimeter*, KNU, Kyiv, Ukraine, pp. 6–12.
7. (2010), *Eyes of the Army. The Army Roadmap for UAS 2010–2035*, Army UAS CoE Staff, U. S. Army, 140 p.
8. Pashchuk, Ju.M. & Salnyk Ju.P. (2015), “Tactical unmanned aerial vehicles: opportunities and limitations in application”, *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 1(18), pp. 23–28.
9. Harchenko, V.S., Jastrebenckij, M.A. & Fesenko G.V. (2017), “NPP post-accident monitoring system using unmanned aerial vehicles: reliability models”, *Jaderna ta radiacijna bezpeka*, No. 4 (76), pp. 50–54.
10. Zvezhinskij, S.S., Ivanov, V.A. & Rudnichenko, V.A. (2008), *Classifications, features and information-measuring models of detection tools*, Bjuro nauchno-tehnicheskij informacii, available at: <http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=869&lvl=19.01.02>.
11. Buslenko N. P. (1978), *Complex systems Simulation*, Nauka, Moscow, 399 p.
12. Volochiy, B. Ju. (2004), *Technology of information systems behavior algorithms modeling*, LP, Lviv, 220 p.
13. Vollmerhausen, R.H. & Jacobs, Ed.(2004), *The targeting task performance metric*, Technical report, AMSEL-NV-TR-230, Rev. 20, 126 p., available at: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/ADA422493.xhtml>.
14. Volochiy, B., Zmysnyj, M. & Onyshchenko, V. (2019), “Possibilities estimation of the security alarm system complex with various quantity of seismic sensors near a control zone”, *Systemy ta tehnologii*, No. 1(57), pp. 47–67, DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2019-1-57-4>.
15. Salnyk Yu., Volochiy, B. & Onishchenko V. (2020), “Stochastic model of the reaction the unattended ground sensor system based on {3+3} scheme”, *Proceedings of 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2020)*, Lviv-Slavske, Ukraine, February 25–29.2020. Paper ID 148, DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235482>.
16. Salnyk Y., Pashchuk, Yu. & Matala, I. (2013), “Mini-UAV flight and payload automated control system”, *Military-technical collection*, NASV, No. 2(9), pp. 90–94.
17. Freeman, P. & Balas, G. (2014), “Actuation failure modes and effects analysis for a small UAV”, *American Control Conference*, USA, pp. 1292–1297, DOI: <https://doi.org/10.1109/ACC.2014.6859482>.
18. Mitrahovich, M.M., Silkov, V.I. & Samkov, A.V. (2012), *Unmanned aerial systems: methods of comparative assessment of combat capabilities*, CNII VVT VS Ukrainy, Kyiv, 302 p.

Received (Надійшла) 08.12.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.02.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Сальник Юрій Павлович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, докторант, Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, Україна;

Yurii Salnyk – Candidate of Technical Sciences, Senior Research, doctoral student, Hetman Petro Sahaidachny National Army Academy, Lviv, Ukraine;

e-mail: jurasalnik@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0772-6811>.

Волочий Богдан Юрійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювання, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна;

Bohdan Volochiy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Theoretical Radio Engineering and Radio Measurement Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine;

e-mail: bvolochiy@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5230-9921>.

Стохастическая модель функционального поведения охранной системы объекта критической инфраструктуры

Ю. П. Сальник, Б. Ю. Волочий

Аннотация. Актуальность. Объекты критической инфраструктуры нуждаются в надежной охране. К системам охраны таких объектов предъявляются специфические требования. Выполнение части этих требований может

обеспечивать комплекс охранной сигнализации, в котором используются сигнализационные системы с сейсмическими датчиками. Вторую часть требований может выполнить беспилотный авиационный комплекс. Поэтому практическая целесообразность видится в сочетании этих двух комплексов в одной охранной системе с тремя зонами контроля. Первую (дальнюю) и вторую (ближнюю) зоны контроля обслуживает комплекс охранной сигнализации. Третья зона контроля (зона сопровождения нарушителя) назначается на основе данных от комплекса охранной сигнализации о типе нарушителя, его скорости и направлении движения. Беспилотный авиационный комплекс применяют для выполнения задания охранной системой в зоне сопровождения нарушителя по команде от комплекса охранной сигнализации. Для реализации такой охранной системы надо знать ответы на два вопроса. Первый, какое значение показателя эффективности охранной системы обеспечит сочетание существующих комплексов с их показателями функциональности. И второй, какими должны быть требования к показателям функциональности этих комплексов, чтобы охранная система обеспечивала необходимое значение показателя эффективности. Поэтому целью статьи является показать потенциальное значение показателя эффективности охранной системы, сформированной из существующих комплексов, а также оценить возможности повышения ее эффективности. **Метод.** Достичь поставленной цели позволяет стохастическая модель функционального поведения, которая должна воспроизводить все варианты реакции составляющих охранной системы на пересечение нарушителями трех зон контроля. **Результаты.** Основным результатом является дискретно-непрерывная стохастическая модель функционального поведения охранной системы объекта критической инфраструктуры в виде системы из 76 дифференциальных уравнений Колмогорова – Чепмена. Степень адекватности стохастической модели позволяет, кроме задачи анализа эффективности охранной системы, решать задачу синтеза показателей функциональности составляющих комплексов, которые объединены в охранную систему. **Выводы.** Проведенные исследования показали, что для объектов критической инфраструктуры создавать охранную систему на основе существующих комплексов охранной сигнализации и беспилотных авиационных комплексов нецелесообразно из-за того, что она будет иметь недопустимо низкую эффективность. На основе решения задачи синтеза представлены значения показателей функциональности составляющих каждого комплекса, в частности те, которые обеспечат необходимое значение показателя эффективности охранной системы. Стохастическая модель функционального поведения охранной системы может быть использована в информационной технологии ее проектирования для поиска компромиссных решений между различными вариантами состава, структуры и функционального поведения охранной системы.

Ключевые слова: стохастическая модель; эффективность системы; функциональное поведение системы; сигнализационная система с сейсмическим датчиком; комплекс охранной сигнализации; беспилотный авиационный комплекс, охранная система.

A stochastic model of the security system's functional behavior for a critical infrastructure object

Yurii Salnyk, Bohdan Volochiy

Abstract. Context. Objects of critical infrastructure require adequate security. The security systems for such objects have a specific requirements. Fulfilment of part of these requirements can provide by an unattended ground sensor complex which uses seismic sensors. The second part of the requirements can be performed by an unmanned aircraft complex. Therefore, it is seen as practical feasibility to combine these two complexes in one security system with three control zones. The first (Further) and second (Hither) control zones are served by an unattended ground sensor complex. The third control zone (intruder escort zone) is assigned on the data from the unattended ground sensor complex: the type of intruder, his speed and direction of movement. The unmanned aircraft complex is used to perform a security system task in the intruder's tracking area on command from the unattended ground sensor complex. You need to know two question answers to implement such a security system. First, what is the efficiency indicator value of the security system will ensure the combination of the existing complexes with their functionality indicators. And the second, what should be the functionality indicators requirements of these complexes in order for the security system to provide the required performance indicator value. **Objective.** Therefore, the goal of the article is to show the potential value of the efficiency index of the security system formed from the existing complexes, as well as to assess the possibility of increasing its efficiency. **Methods.** This goal is achieved by the stochastic model of functional behavior, which should reproduce all variants of the security system components reaction to the crossing of three control zones by intruders. **Results.** The main result is a discrete-continuous stochastic model of the functional behavior of the critical infrastructure object security system in the form of 76 Kolmogorov-Chapman differential equations system. The grade of the stochastic model adequacy makes it possible, in addition to the analysis tasks of the security system effectiveness, to solve the synthesis tasks of functionality indicators of the complex components that are integrated into the security system. **Conclusions.** Research was conducted have shown that it is impractical to create a security system based on existing unattended ground sensor complexes and unmanned aircraft systems for critical infrastructure objects because of the unacceptably low system efficiency. Based on the synthesis task solution, the functionality indicators values of the each complex components, in particular those that will provide the required value of the security system efficiency indicator, are presented. The stochastic model of the functional behavior of the security system can be used in the information technology of its design to find compromise solutions between different variants of composition, structure and functional behavior of the security system.

Keywords: stochastic model; system efficiency; system functional behavior; unattended ground sensor complex with seismic sensor; unmanned aircraft complex; security system.

О. В. Ходаковський, Л. О. Левченко, В. П. Колумбет, А. Д. Козачук, Д. С. Кужавський

Національний технічний університет України

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

РОЗРАХУНКОВИЙ АПАРАТ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ РІЗНОРІДНИХ ДЖЕРЕЛ

Анотація. Запропоновано прийнятний за припущеннями та спрощеннями і достатній за похибками кінцевих результатів розрахунковий апарат для моделювання поширення на визначеній площі електричних, магнітних та електромагнітних полів. Показано, що для моделювання поширення електричних та магнітних полів наднизьких частот (монітори, джерела безперебійного живлення, трансформатори, електродвигуни та генератори) треба розглядати ці джерела як джерела дипольного та дипольно-квадрупольного типу. Тобто, поле локального джерела можна розглядати як комбінацію електричних та магнітних диполів. Це надає змогу з достатньою точністю окреслити зони перевищення гранично-допустимих напруженостей полів. Для моделювання поширення електромагнітних полів дуже високих та ультрависоких частот адаптовано розрахунковий апарат, що використовувався для визначення інтенсивностей випромінювання радіолокаційного обладнання цивільної авіації. Надано розрахунки коефіцієнтів, які враховують параметри діаграм спрямованості випромінювань у горизонтальній та вертикальній площинах для найбільш розповсюджених джерел випромінювань. Наведені співвідношення і відповідні коефіцієнти можуть бути застосовані для визначення електромагнітної обстановки за наявності багатьох високочастотних джерел (базових станцій мобільного зв'язку, навігаційного обладнання, радіорелейних станцій тощо). Запропонований підхід дозволяє автоматизувати процеси проектування розміщення електромагнітного, електронного та радіотехнічного обладнання на виробничих площах та територіях, а також здійснювати оцінювання впливу на довкілля на стадіях проектних робіт. Це надасть змогу окреслити ізольовані меж перевищення граничнодопустимих рівнів електричних магнітних та електромагнітних полів для різних частотних діапазонів та категорій обладнання і визначити у автоматичному режимі електромагнітне навантаження у кожній точці контрольованого простору.

Ключові слова: електромагнітне поле; моделювання; наднизькі частоти; ультрависокі частоти; напруженість поля.

Вступ

Моделюванню просторових розподілів електричних, магнітних та електромагнітних полів електричного та електронного обладнання приділяється багато уваги. Такі роботи здійснюються у двох напрямках: визначення розподілів полів у середині пристроїв-трансформаторів, електричних машин тощо з метою вдосконалення їх конструкцій та моделювання зовнішніх полів обладнання з метою підвищення рівнів електромагнітної сумісності та електромагнітної безпеки персоналу та населення. Зазвичай розглядається один пристрій або група однотипних пристроїв, електричне, магнітне, електромагнітне поле однієї частоти (спектри частот). Але у реальних виробничих умовах експлуатується обладнання, яке генерує електромагнітні поля широкого спектру з різними закономірностями просторових коливань. Розміщення такого обладнання на виробничих площах або територіях з метою забезпечення мінімального взаємного впливу та електромагнітної безпеки персоналу є складною задачею. Її розв'язання на стадії виконання проектних робіт або проведення оцінки впливу на довкілля, об'єкта будівництва, можливі тільки за розрахунків моделювання поширення полів, виходячи з технічних даних обладнання або використання вихідних експериментальних даних щодо аналогічного обладнання. Для цього потрібен комплекс математичних співвідношень, прийнятних за припущеннями та спрощеннями, які дозволяють оцінити рівні електромагнітних полів на визначеному

об'єкті за наявності різномірних джерел з урахуванням їх гранично допустимих рівнів. Це спростить процедуру створення прикладного програмного забезпечення, яке дозволить у автоматизованому режимі визначати і прогнозувати електромагнітне навантаження в усіх критичних точках контрольованої зони.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У більшості робіт з моделювання розподілів електромагнітних полів розглядаються магнітні поля, що поширюються у середині електротехнічного обладнання і впливають на його роботоспроможність та енергоефективність [1, 2]. Моделювання зовнішніх електромагнітних полів електротехнічного обладнання реалізується з використанням гармонічного аналізу на основі розв'язання рівняння Гауса для скалярного потенціалу [3, 4]. Для внутрішніх магнітних полів зазвичай застосовують пакет Comsol, який дозволяє отримати моделі з мінімальними похибками [5]. Але у багатьох випадках велика точність не потрібна, тому застосовується стандартний пакет Matlab та офіційний розрахунковий апарат. Це дає прийнятний результат для ліній електропередачі [6]. Аналіз досліджень зовнішніх магнітних полів електричного та електронного обладнання дозволяє дійти висновку, що більшість технічних засобів генерують магнітні та електромагнітні поля дипольного, дипольно-квадрупольного типу [7]. Тому розрахунковий апарат для моделювання електричних та магнітних полів може базуватися на розрахунках полів у формі диполів та їх комбінацій.

При цьому поля розосереджених джерел (ліній передавання енергії та електроживлення будівель) розраховуються, у разі потреби, за відомими співвідношеннями.

Щодо джерел електромагнітних полів радіочастот, то підходи до їх розрахунків та визначення загального електромагнітного навантаження на території занадто складні і небеззаперечні [8, 9]. В той же час існують методичні матеріали для розрахунку електромагнітних полів засобів керування повітряним рухом цивільної авіації [10], які можна адаптувати для розрахунків поширення електромагнітних полів сучасного навігаційного, зв'язкового обладнання з урахуванням діаграм спрямованості та чинних граничнодопустимих рівнів. На сьогоднішній день є доцільним розроблення простого у застосуванні розрахункового апарату, який дозволить здійснити моделювання низькочастотних та високочастотних електромагнітних полів з наданням даних про межі зон перевищення гранично допустимих рівнів.

Постановка завдання. Мета статті – надання комплексу співвідношень, придатних до автоматизації процесів розрахунків і моделювання поширення електромагнітних полів широкого частотного діапазону.

Виклад основного матеріалу

Низькочастотні електромагнітні поля оцінюються окремо за електричною та магнітною складовими. Розрахунки напруженостей електричних полів E базуються на фундаментальному співвідношенні:

$$E = -\text{grad } \phi,$$

де ϕ – потенціал електричного поля; $\text{grad } \phi = \nabla \phi$ – диференціальний оператор Гамільтона,

$$\nabla \phi = \mathbf{i} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial \phi}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial \phi}{\partial z}.$$

Для відстаней, які значно більші за розміри джерела поля, доцільно використовувати визначення параметрів поля у сферичних координатах:

$$\nabla \phi = \mathbf{R}_0 \cdot \frac{\partial \phi}{\partial R} + \mathbf{\theta}_0 \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \theta} + \mathbf{\alpha}_0 \cdot \frac{1}{R \sin \theta} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \alpha}.$$

Більшість широко використовуваного обладнання (відеомонітори, системні блоки, джерела безперебійного живлення, друкуючі пристрої тощо) мають просторові структури електричних та магнітних полів, притаманні електричним та магнітним диполям (теоретично та експериментально показано у [11]). Так, наприклад, усі рідкокристалічні монітори мають електричні поля дипольного типу, джерела безперебійного живлення – магнітні поля дипольного типу. Розрахунок електричного поля базується на визначенні ϕ – скалярного потенціалу електричного поля, розрахунок магнітного поля базується на визначенні $\mathbf{A}$ – векторного потенціалу магнітного поля.

Розглянемо електричний диполь з зарядом $\pm q$ та відстанню l , тобто з електричним дипольним моментом $\mathbf{P} = q \cdot l$ (рис. 1). Скалярний потенціал електричного поля у точці спостереження a має вигляд:

$$\phi_a = \frac{q}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{q}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{R_2 - R_1}{R_2 \cdot R_1},$$

де ε – відносна електрична проникність середовища (для повітря $\varepsilon \approx 1$), ε_0 – діелектрична стала ($\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м).

У реальних умовах $R \gg l$, тобто скалярний потенціал електричного поля дорівнює:

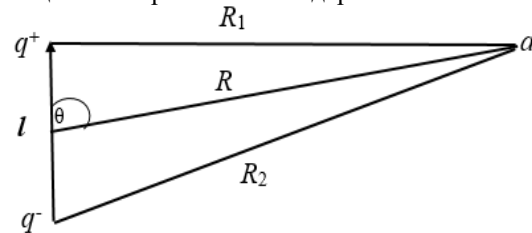


Рис. 1. Схема до розрахунку напруженості електричного поля електричного диполя
(Fig. 1. Scheme for calculating the tension electric field of an electric dipole)

$$\phi \approx P \cdot \cos \theta / (4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R^2).$$

У полярних координатах напруженість електричного поля на площині дорівнює:

$$E_R = -\frac{\partial \phi}{\partial R} = \frac{P \cdot \cos \theta}{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R^3}; \text{ радіальна складова,}$$

$$E_Q = -\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = \frac{P \cdot \sin \theta}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R^3}; \text{ кутова складова,}$$

$$E_L = 0; \text{ кутова складова для координати } Z.$$

Тобто є можливість розглядати просторові зміни електричного поля у одній потрібній площині:

$$E = \sqrt{E_R^2 + E_Q^2} = \frac{P}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R^3} \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot \cos^2 \theta},$$

$$P = 2\pi \varepsilon \varepsilon_0 E r^3,$$

E визначається експериментально на будь-якій відстані r . Сумарне поле у будь-якій точці від багатьох джерел визначається як:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2}.$$

Наведене надає змогу раціоналізувати або навіть оптимізувати з точки зору електромагнітної безпеки розміщення багатьох джерел електричного поля дипольного типу.

Розрахунки напруженостей магнітних полів є аналогічними (електричний дипольний момент P замінюється на магнітний момент m), відповідно ε , ε_0 замінюється на μ , μ_0 :

$$m = i \cdot S,$$

де i – струм у контурі; S – площа контуру; μ – відносна магнітна проникність середовища (для повітря $\mu = 1$); μ_0 – магнітна стала ($1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м);

$$H_R = \frac{m \cdot \cos \theta}{2\pi \cdot R^3}; H_\theta = \frac{m \cdot \sin \theta}{4\pi \cdot R^3}; m = 2\pi\mu_0 H r^3,$$

де H визначається експериментально.

Зазвичай, нормується індукція магнітного поля B :

$$B = \mu_0 H; H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + \dots + H_n^2}.$$

Більшість електричних машин чотириполюсні, а їх магнітне поле – дипольно-квадрупольне.

Наведене дає змогу розрахувати та автоматизувати процес визначення сумарного електромагнітного навантаження у будь-якій точці обраної площі за наявності багатьох джерел низькочастотних електричних полів. Електромагнітні поля високочастотних діапазонів нормуються як за напруженостями складових, так і за щільностями потоків енергії (В/м², мкВт/см²).

Розраховується поширення електромагнітних випромінювань діапазонів 8 (дуже високі частоти, 30–300 МГц, ГДР–6 В/м) та 9 (ультрависокі частоти, 0,3–9 ГГц, ГДР–10, 15, 20 мкВт/см²). Для діапазону 8 розрахунок здійснюється зі співвідношення:

$$E = \frac{\sqrt{30PG\eta}}{R} KF(\theta)F(\varphi),$$

де E – напруженість електричного поля (В/м) на відстані R (м), P – напруженість випромінювача (Вт), G – коефіцієнт підсилення антени, η – коефіцієнт передачі антенно-фідерного тракту, K – множник впливу землі, $F(\theta)$ – коефіцієнт врахування діаграми спрямованості у вертикальній площині, $F(\varphi)$ – коефіцієнт врахування діаграми спрямованості у горизонтальній площині.

Розраховується розподіл напруженості поля для найбільш поширених джерел: $P = 25, 100, 300$ Вт; $G = 8, 31, 31$; $\eta = 0,1$; $K = 1,4$.

Значення $F(\theta)$ отримуються з таких діаграм спрямованості:

- 1) для $F(\theta) = F(\varphi) = 1$ – для 360° ;
- 2) для $F(\theta) = F(\varphi) = 1$ – для сектора $\pm 30^\circ$ (табл. 1).

Таблиця 1 – Значення $F(\theta)$

$F(\varphi)$	φ , град
1,00	0
0,95	5
0,90	10
0,80	15
0,30	20
0,05	25
0,01	30

Сектор випромінювання 60° по горизонталі і вертикалі. Для діапазону 9 розрахунок здійснюється зі співвідношення:

$$W = \frac{8PGKF^2(\theta)\eta}{R^2},$$

де W – щільність потоку енергії випромінювання мкВт/см² на відстані R (м), P – напруженість випромінювача (Вт), G – коефіцієнт підсилення антени, η – коефіцієнт передачі антенно-фідерного тракту, K – множник впливу землі, $F^2(\theta)$ – множник нормованої діаграми спрямованості у напрямку об'єкта опромінення. Наведене співвідношення адаптоване для отримання результату у мкВт/см², що фігурує у нормативах.

Розраховується розподіл щільності потоків енергії для: $P = 8, 32, 100, 1000$ Вт; $G = 32, 32, 8, 8$; $K = 1,4$; $\eta = 1$.

Два варіанти:

1) для $F^2(\theta) = 1$ на 360° (енергія випромінювання розподіляється по колу);

2) для сектора $\pm 5^\circ$ (10°) $F^2(\theta)$ (табл. 2)

Таблиця 2 – Коефіцієнти $F^2(\theta)$

$F^2(\theta)$	θ , град
1,00	0
0,95	1
0,90	2
0,75	3
0,55	4
0,45	5
0,25	6
0,15	7
0,05	8

Для отримання електромагнітного навантаження у будь-якій точці розглядаються умови, коли зони перетинаються:

$$W_{\text{на}} = W_1 + W_2 + \dots + W_n,$$

$$E_{\text{на}} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2}$$

Прогнозування електромагнітної обстановки, виходячи з наведених співвідношень є оціночним через можливі зміни потужності випромінювачів, коефіцієнтів впливу землі тощо. Визначення можливих змін електромагнітного навантаження у окремих зонах внаслідок відбиття хвиль від стін будівель та інших поверхонь здійснюється на конкретних об'єктах з урахуванням взаємного розташування споруд та матеріалів поверхонь. Але за умови автоматизації розрахунків отримання ізоляцій зон перевищення гранично допустимих рівнів електромагнітних полів за різних початкових умов не складає проблеми.

Висновки

1. Обґрунтовано, що розрахунковий апарат для моделювання поширення електричних, електромагнітних та магнітних полів зі спрощеннями, прийнятими для оцінювання електромагнітної обстановки на визначених площах та територіях, повинен бути зручним для автоматизації обчислень та здійснення оптимізації розміщення електричного, електротехнічного та електронного обладнання.

2. Показано, що більшість локальних джерел електромагнітних полів є джерелами з дипольною та

дипольно-квадрупольною структурами електричних та магнітних полів. Для оцінювання їх рівнів застосовуються співвідношення, подібні для розрахунку електричних та магнітних диполів або рівняння Гауса для скалярного потенціалу (дипольно-квадрупольних джерел).

3. Для визначення поширення електромагнітних полів дуже високих та ультрависоких частот доцільно адаптувати

співвідношення, які застосовуються для розрахунків рівнів випромінювання радіолокаційного обладнання цивільної авіації. За наявності даних про потужність коефіцієнта підсилення та коефіцієнта передачі у антенно-фідерному тракті, діаграм спрямованості випромінювачів можна з прийнятною похибкою розрахувати розподіл рівнів електромагнітних полів усіх поширених джерел.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств. *Техническая электродинамика*. 2015. № 2. С. 3–15.
2. Заблодский Н. Н., Филатов М. А., Грицюк В. Ю. Численное моделирование электромагнитных полей в полифункциональных электромеханических преобразователях с полым перфорированным ротором. *Електротехніка і електромеханіка*. 2012. № 1. С. 25–27.
3. Степанов А. Н. Моделирование внешнего магнитного поля трехфазной электрической машины. *Ученые записки, Комсомольск-на-Амуре: ГТУ*, 2011. № III-1 (7). С. 13–20.
4. Левченко Л. О., Сукач С. В., Коновалова О. В. Моделювання просторових розподілів магнітних полів електричних машин для визначення зон безпечного перебування персоналу. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2014. Вип. 6 (89), Ч. 1. С. 27–31.
5. Pryor R.W. *Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach*. Jones and Bartlett Publishers. 2011. 872 p.
6. Левченко Л. О. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів повітряних ліній електропередачі. *Системи обробки інформації*. 2016. № 1. С. 29–37.
7. Кирпанев А. В., Лавров В. Я. Электромагнитное поле: Теория идентификации ее применение. Москва, Вузовская книга, 2012. 278 с.
8. Мордачев В. И. Электромагнитная нагрузка на территорию, создаваемая электромагнитными излучениями базовых станций сотовой связи. *Доклады белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. 2012. № 6. С. 114–121.
9. Мордачев В. И., Свистунов А. С. Необходимый и достаточный уровень мощности электромагнитного излучения базовых станций сети GSM. *Доклады белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. 2013. № 7. С. 44–50.
10. Шандала М. Г., Думанський Ю. Д., Іванов Л. С. Методичні вказівки з визначення рівнів електромагнітного поля засобів керування повітряним рухом цивільної авіації ВЧ-, ДВЧ-, УВЧ-, та НВЧ-діапазонів. Москва, 1988. 44 с.
11. Перельот Т. М. Моніторинг та нормалізація рівнів низькочастотних електромагнітних полів у виробничих умовах: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01. Київ, 2017. 145 с.

REFERENCES

1. Podoltsev, A.D. and Kucheryavaya, I.N. (2015), "Multiphysical modeling of electrotechnical devices", *Technical electrodynamics*, No. 2, pp. 3–15.
2. Zablodskiy, N.N., Filatov, M.A. and Gritsyuk, V.Yu. (2012), "Numerical modeling of electromagnetic fields in polyfunctional electromechanical converters with a hollow perforated rotor", *Electrotechnics and electromechanics*, No. 1, pp. 25–27.
3. Stepanov, A.N. (2011), "Modeling of the external magnetic field of a three-phase electric machine" *Scientific notes*, GTU, Komsomolsk-on-Amur, No. III-1 (7), pp. 13–20.
4. Levchenko, L.O., Sukach, S.V. and Konovalova, O.V. (2014), "Modeling of spatial distributions of magnetic fields of electric machines for definition of zones of safe stay of personnel", *Bulletin of Kremenichuk Mykhailo Ostrogradsky National University*, Is. 6 (89), part 1, pp. 27–31.
5. Pryor, R.W. (2011), *Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach*. Jones and Bartlett Publishers, 872 p.
6. Levchenko, L.O. (2016), "Modeling of spatial distributions of electromagnetic fields of overhead power lines", *Information processing systems*, No. 1, pp. 29–37.
7. Kirpanev, A.V. and Lavrov, V.Ya. (2012), *Electromagnetic field: The theory of identification and its application*, University book, Moscow, 278 p.
8. Mordachev, V.I. (2012), "Electromagnetic load on the territory created by electromagnetic radiation of base stations of cellular communication", *Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*, No. 6. pp. 114–121.
9. Mordachev, V.I. and Svistunov, A.S. (2013), "Necessary and sufficient power level of electromagnetic radiation of base stations of the GSM network", *Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*, No. 7, pp. 44–50.
10. Shandala, M.G., Dumansky, Yu.D. and Ivanov, L.S. (1988), *Methodical instructions for determining the levels of the electromagnetic field for air traffic control of civil aviation of the HF, UHF, UHF, and microwave bands*. Moscow, 44 p.
11. Perelyot, T.M. (2017), *Monitoring and normalization of levels of low-frequency electromagnetic fields in production conditions*, diss PhD 05.26.01, Kyiv, 145 p.

Received (Надійшла) 14.10.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.12.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Хоодаковський Олексій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Oleksii Khodakovskiy – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine;

e-mail: dzgeron@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3930-0030>.

Левченко Лариса Олексіївна – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Larysa Levchenko – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine;

e-mail: larlevch@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7227-9472>.

Колумбет Вадим Петрович – старший викладач кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Vadym Kolumbet – Senior Lecturer of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine;

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

Козачук Анна Дмитрівна – магістрант кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Anna Kozachuk – master's student of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine;

e-mail: vkstarog@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1101-9837>.

Кужавський Дмитро Сергійович – магістрант кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Dmytro Kuzhavskiy – master's student of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine;

e-mail: dimakoujav@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6412-0752>.

Расчетный аппарат моделирования распространения электромагнитных полей разнородных источников

А. В. Хоодаковский, Л. А. Левченко, В. П. Колумбет, А. Д. Козачук, Д. С. Кужавский

Аннотация. Предложен приемлемый по предположениям и упрощениям и достаточный по погрешностям конечных результатов расчетный аппарат для моделирования распространения на определенной площади электрических, магнитных и электромагнитных полей. Показано, что для моделирования распространения электрических и магнитных полей сверхнизких частот (мониторы, источники бесперебойного питания, трансформаторы, электродвигатели и генераторы) надо рассматривать эти источники как источники дипольного и дипольно-квадрольного типа. То есть, поле локального источника можно рассматривать как комбинацию электрических и магнитных диполей. Это дает возможность с достаточной точностью определить зоны превышения предельно допустимых напряженностей полей. Для моделирования распространения электромагнитных полей очень высоких и ультравысоких частот адаптирован расчетный аппарат, который использовался для определения интенсивностей излучения радиолокационного оборудования гражданской авиации. Предоставлены расчеты коэффициентов, учитывающих параметры диаграмм направленности излучения в горизонтальной и вертикальной плоскостях для наиболее распространенных источников излучений. Приведенные соотношения и соответствующие коэффициенты могут быть применены для определения электромагнитной обстановки при наличии многих высокочастотных источников (базовых станций мобильной связи, навигационного оборудования, радиорелейных станций и т.п.). Предложенный подход позволяет автоматизировать процессы проектирования размещения электромагнитного, электронного и радиотехнического оборудования на производственных площадях и территориях, а также осуществлять оценку влияния на окружающую среду на стадиях проектных работ. Это позволит определить изолинии границ превышения предельно уровней электрических магнитных и электромагнитных полей для различных частотных диапазонов и категорий оборудования и определить в автоматическом режиме электромагнитную нагрузку в каждой точке контролируемого пространства.

Ключевые слова: электромагнитное поле; моделирование; сверхнизкие частоты; ультравысокой частоты; напряженность поля.

Calculation apparatus for modeling the distribution of electromagnetic fields of different sources

Oleksii Khodakovskiy, Larysa Levchenko, Vadym Kolumbet, Anna Kozachuk, Dmytro Kuzhavskiy

Abstract. The calculation apparatus acceptable for assumptions and simplifications and sufficient for errors of final results for modeling the propagation of electric, magnetic and electromagnetic fields spread over a certain area was proposed. It is shown that to model the propagation of ultra-low frequency electric and magnetic fields (monitors, uninterruptible power

supplies, transformers, electric motors and generators) it is possible to consider these sources as dipole and dipole-quadrupole type sources. That is, the field of the local source can be considered as a combination of electric and magnetic dipoles. This makes it possible to delineate with sufficient accuracy the zones of exceeding the maximum allowable field strengths. The calculation apparatus used to determine the radiation intensities of civil aviation radar equipment was adapted to model the propagation of electromagnetic fields of very high and ultra-high frequencies. The calculations of coefficients that take into account the parameters of radiation patterns in the horizontal and vertical planes for the most common radiation sources are given. These ratios and corresponding coefficients can be used to determine the electromagnetic environment in the presence of many high-frequency sources (mobile communication base stations, navigation equipment, radio relay stations, etc.). The proposed approach allows to automate processes of designing the placement of electromagnetic, electronic and radio equipment in production areas and territories, as well as to assess the environmental impact at the stages of design work. This will make it possible to delineate the isolines of the limits of exceeding the maximum permissible levels of electric magnetic and electromagnetic fields for different frequency ranges and categories of equipment and to automatically determine the electromagnetic load at each point of the controlled space.

Keywords: electromagnetic field, simulation, ultra-low frequencies, ultra-high frequencies, field strength.

Adaptive control methods

UDC 004.89

doi: 10.20998/2522-9052.2021.1.05

Ihor Butko

SE "State Land Cadaster", Kyiv, Ukraine

THE USE OF GEOSPATIAL INFORMATION BY PUBLIC AUTHORITIES TO SUPPORT THE DECISION MAKING OF MANAGEMENT

Abstract. The article proposes the use of geospatial information to support managerial decision-making by public authorities in the field of reintegration of temporarily occupied territories in Donetsk, Luhansk regions and Crimea. Variants of application of decision support systems in the management of immovable military property of the Armed Forces of Ukraine, the existing algorithms and methods of the decision support system in land relations are analyzed. Proposals are presented to support the adoption of managerial decisions by public authorities on the basis of Earth remote sensing data. The algorithm for the functioning of the decision support system in solving the problems of reintegration of temporarily occupied territories has been improved. The proposed sequence of actions of the method of the process of supporting the adoption of administrative decisions by public authorities in the field of reintegration of temporarily occupied territories using geospatial information, mathematical constructions of category theory and predicate logic. The order of implementation of the sequence of actions of this method is given. By improving and detailing the proposed method, it is possible to form a more effective system for supporting the adoption of managerial decisions by public authorities using geospatial information.

Keywords: geospatial information; Earth remote sensing; public authority; decision support system; DSS; category theory; predicate logic; formalization.

Introduction

Formulation of the problem and research tasks.

Unimpeded obtaining of species information on areas and objects of interest and the fact that the necessary information is obtained remotely are arguments for using Earth remote sensing data to solve such a problem as supporting management decisions by public authorities using geospatial information [1, 2]. Earth remote sensing data is practically the only source of objective and operational information due to the impossibility of a direct assessment of the state and development of events and objects in the temporarily occupied territories [2, 3]. Therefore, the most popular information about the current, objective and visual assessment of the area of temporarily occupied territories in the Donetsk and Luhansk regions and in the Crimea is information from remote sensing of the Earth [1-3].

Today, based on Earth remote sensing data, the following activities can be started [1, 2]:

- to generate catalogues and databases about the territory and the enterprise (especially with potentially hazardous production);
- to monitor the current state of territories and facilities;
- to analyze and predict the possible consequences of "management" in the territories;
- to develop comprehensive reintegration plans and solutions in advance;
- etc.

The results of the analysis of economic activities in the temporarily occupied territories can be used in some directions. This is both an analysis of the use of land, industrial and infrastructural facilities, as well as forecasting the necessary measures to be taken for

restoration. Lands where military operations took place, or where fortifications were built, require special attention. In this case, it is especially important to assess the safety of the further use of these territories.

Today, during the reintegration of the temporarily occupied territories, it is important to solve many pressing technical problems with the help of information from remote sensing of the Earth. For example, the construction of TV towers for broadcasting Ukrainian broadcasting in uncontrolled territories and the installation of digital repeaters, control of illegal constructions and the like.

Species information (both basic and current) can be simultaneously used in the interests of various ministries and departments. And since at present Ukraine does not have its own spacecraft for remote sensing of the Earth, such a multipurpose use will significantly save both resources for acquiring actual species images and computing resources for their thematic interpretation. It is advisable to oppose the consolidation of the results obtained in the Ministry for the Reintegration of the Temporarily Occupied Territories.

In general, the use of geospatial information should be divided into four areas [2]:

- inventory;
- monitoring;
- operational;
- research.

It is clear that for each type of problem it is necessary to use its own set of input data, which is different in its spatial, temporal and spectral characteristics.

To solve problems, for example, in agriculture, it is quite possible to limit the use of information of medium resolution. However, in the interests of land

inventory, monitoring of industrial, energy, and military facilities, it is advisable to use aerial photography

information, which has a high (5 cm) resolution, as reference information (Fig. 1) [4].



Fig. 1. Fragment of the results of aerial photography of the territory of Donetsk region [4]

It should be borne in mind that it is necessary to use not "one-time" shooting of objects and areas of interest, but to analyze the ensemble of images. This group of snapshots will then fill the corresponding catalogs or databases and will allow you to evaluate events in dynamics [5].

Today, to solve the problems of reintegration of temporarily occupied territories, modern information technologies can be used, which are a necessary tool in the development of decision support systems (DSS). DSS use equipment, software, databases, knowledge base and operator's work in order to support all stages of decision-making in the process of analytical modelling [6, 7].

Automation and informatization are the basis for systematizing and bringing relations in the field of reintegration of temporarily occupied territories to European standards. Therefore, the creation of high-performance automation and informatization systems should be based on intelligent information technologies. These information technologies are based on decision support systems. These information systems must have powerful software in the form of appropriate methods, algorithms and models.

Analysis of recent research and publications.

When solving the problem of providing proposals for supporting the adoption of managerial decisions by public authorities using geospatial information of temporarily occupied territories, it is advisable to use a DSS. This DSS provides a thorough and objective analysis of a given subject area when making decisions in these difficult conditions [6, 7]. Thus, the DSS by collecting and analyzing a large amount of information from Donetsk, Lugansk regions and Crimea can influence the process of making managerial decisions by public authorities.

Modern decision support systems have emerged as a result of the merger of management information systems and database management systems [8]. As a result, systems have emerged that are maximally adapted to solving the problems of daily management activities. They are a tool to help those who decide. It is

important to emphasize that the role of the person who makes decisions remains a priority. And the DSS allows you to replace human resources at the stage of processing and structuring the initial data of geospatial information [2, 9].

With the help of DSS, the choice of solutions can be carried out in certain unstructured and poorly structured tasks. Also in tasks that have many criteria.

DSS can be developed only if there is a database and a knowledge base. Databases are a collection of geospatial data, defined calculations and studies. Knowledge bases contain inference rules, information about human experience and knowledge in a given subject area, which allow you to perform operations on these databases [10].

The paper [11] analyzes the problematic issues of the decision-making process in managing only immovable military property of the Armed Forces of Ukraine. The above classification of DSSs is based on considering their features. This allows you to determine the basic requirements for the functioning of the DSS in the management of real estate military property.

The Unified management system of administrative and economic processes of the Armed Forces of Ukraine is considered. It ensures openness and transparency of the administrative and economic activities of the Armed Forces of Ukraine, optimization of the planning processes, distribution and use of financial, material and other resources to ensure the life of the troops. It is believed that the Unified Administrative Processes Management System of the Armed Forces of Ukraine provides reliable information. This information is necessary for making management decisions by the leadership of the Armed Forces of Ukraine. However, the basis of this system is the information base of only those real estate objects that are on the balance sheet of the Armed Forces of Ukraine. And it is implemented in the real estate military property management subsystem, which has been accepted for permanent operation.

In [12], an algorithm for the functioning of the decision support system in land relations is proposed.

The problem of using only ontological engineering of land relations is considered. Improving this algorithm can also be used to solve the problem of supporting the adoption of managerial decisions by public authorities in the field of reintegration of temporarily occupied territories in Donetsk, Luhansk regions and in Crimea using Earth remote sensing data.

The **goal** of the article is to develop proposals to support the decision making of management by public authorities using geospatial information.

Main material

The decision support system uses information from remote sensing of the Earth to develop solutions and recommendations for the task in the field of reintegration of temporarily occupied territories. This information comes from spacecraft, industrial aerial vehicles (aircraft, helicopters, unmanned aerial vehicles), non-industrial media (aerostats, paragliders, radio-controlled aircraft models), ground-based instruments (ground laser scanners), etc. [2]. This data is received and stored in the central data warehouse, which is part of the hierarchical structure of the DSS. The central data warehouse includes a database and a knowledge base [8].

The knowledge base should contain attributive information about the temporarily occupied territories, objects, owners and reintegration tasks. Knowledge base should consist of models of formalization of law, which can be constructed either by logical or approximate methods, or by their combinations.

For the formal presentation of data in the knowledge base in the decision support system in the development of decisions and recommendations for the task in the field of reintegration of temporarily occupied territories, we will use the approach proposed in the paper [12]. Namely, we will choose the methods of category theory. This is due to the fact that when developing a decision support system, it is necessary to take into account the representation of knowledge in the knowledge base by ontological models.

These methods allow using such mathematical constructions as statements, predicates, etc. in the form of category objects [13]. This feature of category theory, if necessary, allows you to combine mathematical models that describe the subject area, that is, reintegration relations.

In [12] it is proposed to designate the content of knowledge base in the form of a multilevel model – categories of small categories – Cat which are connected by functors – F .

We use the results of paper [12] to develop a sequence of actions for the method of supporting the adoption of administrative decisions by public authorities in the field of reintegration of temporarily occupied territories using geospatial information.

The peculiarity of this category is that its objects $\{Ob_1^{Cat}, Ob_2^{Cat}\} \subset Cat$ are small categories. The highlighted category Cat consists of two small categories, which are interpreted as follows:

– $Ob_1^{Cat} \equiv K_1$ – a set of laws in the area of reintegration of temporarily occupied territories;

– $Ob_2^{Cat} \equiv K_2$ – a set of schemes for solving tasks in the area of reintegration of temporarily occupied territories, which can be selected in accordance with the specified criteria (rules).

The objects of categories K_1 and K_2 presented in the knowledge base allow for a sequential selection of the law and model, and then put them in compliance $G \subseteq Ob(K_1) \times Ob(K_2)$ (Fig. 2) [12].

The interaction between the objects of the categories K_1 and K_2 is a representation of real tasks in the area of reintegration of temporarily occupied territories, in which:

– $\{Ob_1^{11}, ..., \{Ob_1^{12}, ..., \{Ob_1^{14}, ..., Ob_m^{14}\}\}\} \subset K_1$ – is

the boundary of the sets of the categorical model K_1 ,

where $Ob_1^{11}, Ob_1^{12}, Ob_1^{13}, Ob_1^{14}$ are laws, sections, chapters and articles of legislation in the area of reintegration of temporarily occupied territories, respectively;

– $\sum Mor(K_1, K_2)$ – a set of morphisms between small categories;

– $M = \{m_1, m_2, ..., m_\xi\}$, $\xi = \overline{1, h}$ – a set of schemes for solving problems in the area of reintegration of temporarily occupied territories;

– $D = \{d_j\}$, $j = \overline{1, y}$ – a set of public authorities;

– $S = \{s_i\}$, $i = \overline{1, t}$ – a set participants in the tasks of reintegration of the temporarily occupied territories;

– $Z = \{z_p\}$, $p = \overline{1, l}$ – a set of reintegration tasks;

– $G \subseteq (D \times S \times Z) = \{(d_j, s_i, z_p) \mid d_j \in D, s_i \in S,$

$z_p \in Z\}$ – relations between public authorities, participants in the tasks of reintegration of the temporarily occupied territories and reintegration tasks;

– $G = \{g_q\}$, $q = \overline{1, \delta}$ – a lot of relations between public authorities, participants in the tasks of reintegration of the temporarily occupied territories and reintegration tasks;

– $m_h = \langle s_h, d_q, z_h, g_h \rangle$ – scheme of solving in the reintegration tasks.

Based on the knowledge models of objects and subjects of land relations proposed in [12], a decision support process can be carried out, which is presented in the form of a sequence of actions of the method of supporting the adoption of managerial decisions by public authorities using geospatial information. This sequence of actions is shown in Fig. 3.

The sequence of actions for the implementation of the method of supporting the adoption of managerial decisions by public authorities using geospatial information is as follows:

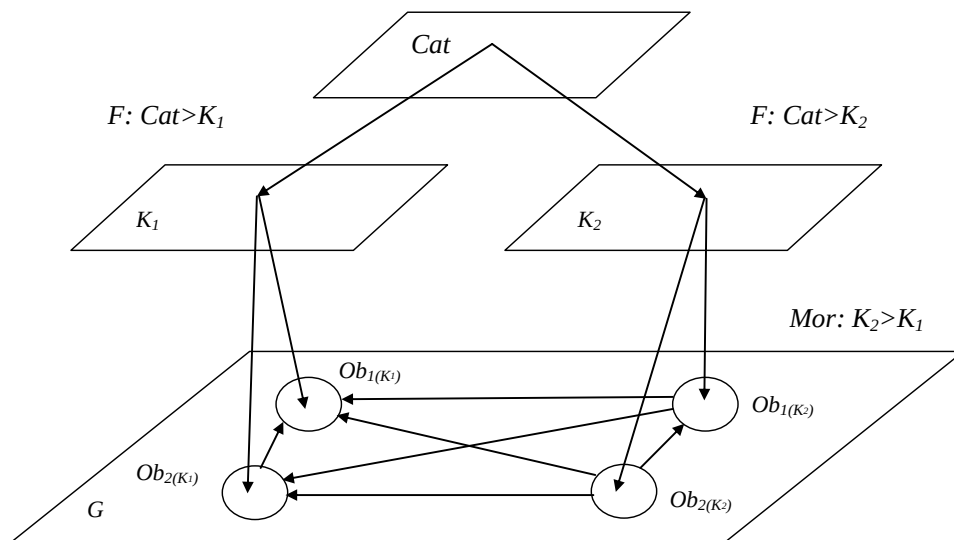


Fig. 2. Multilevel commutative diagram of relations between categories and objects of small categories when solving problems in a decision support system [12]

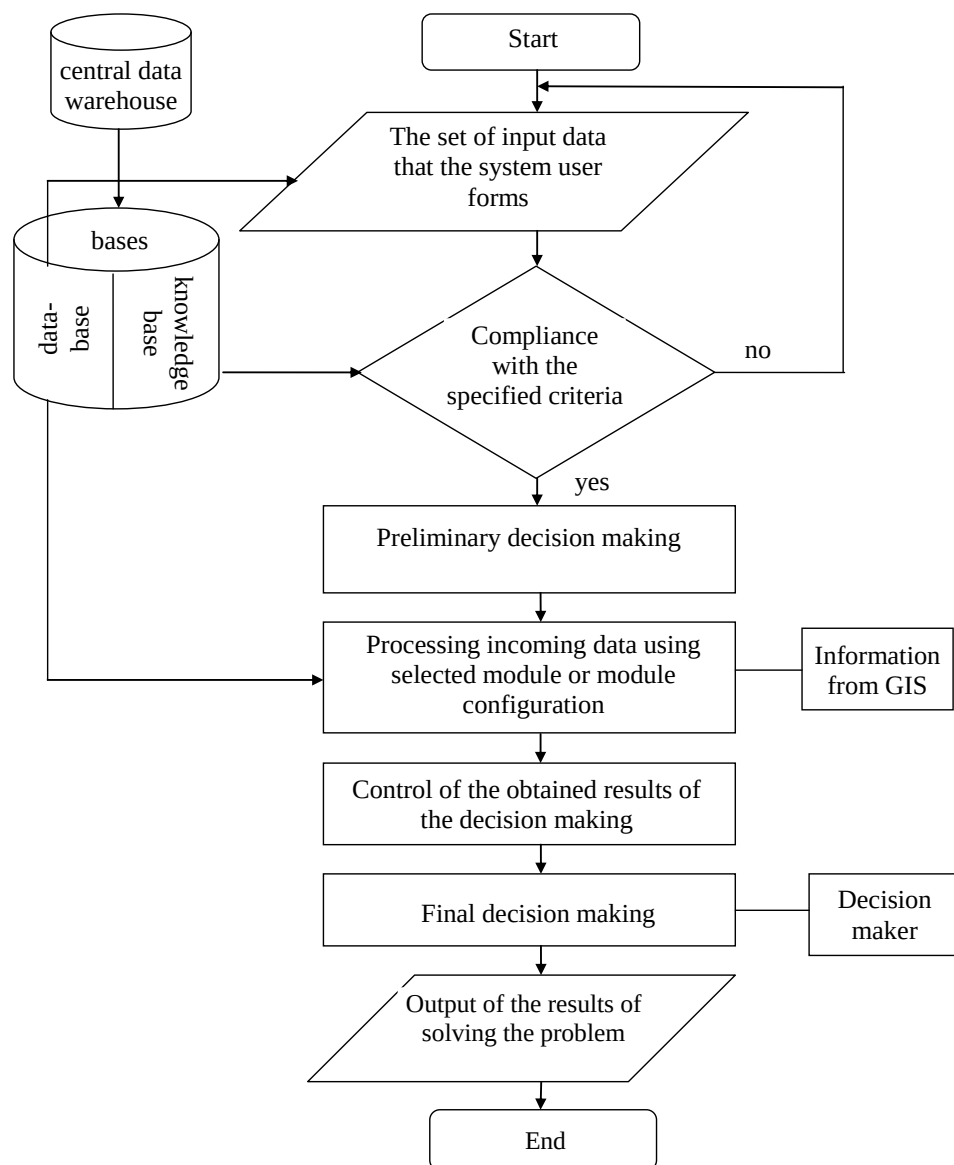


Fig. 3. The sequence of actions of the method of the process of supporting the adoption of managerial decisions by public authorities in the field of reintegration of temporarily occupied territories using geospatial information

– start of the sequence of actions of the method. It determines the need and feasibility of using a decision support system to solve the problem. If they are available, the process proceeds to the next stage of the method;

– formulation of the problem. Formation of a user request in accordance with the attribute data available in the database. At this stage, there is a definition of constraints that allow you to separate acceptable options from unacceptable, and criteria that contribute to the selection of the best of the suitable solutions;

– checking the compliance of the request data with the criteria for their processing. Checking the possibility of using one or another model of the knowledge base. If a discrepancy is detected, a message is generated and the transition to stage of formulation of the problem is carried out to correct the original request;

– preliminary decision making: search for a module or configuration of modules of the decision support system, which is received for servicing the task and the administrator's choice of modules or their configuration for solving the task. This is provided based on ontological models that are presented in the knowledge base;

– processing of data that comes with the help of auxiliary software. It is represented by a module or configuration of modules in the decision support system, which is provided by the administrator. The input data is information from geographic information systems;

– monitoring the proposed solution to the problem of reintegration of the temporarily occupied territories. The decision is corrected if necessary;

– final decision making. The final decision is made with the Earth remote sensing information by the decision maker. And presentation of results in a form and format that is convenient for their analysis by the user;

– the end of the sequence of actions of the method. The final set of resulting data is formed for solving the task that is specified by the user.

The decision support system, which implements the proposed sequence of actions, issues a finite set of

recommendations for solving the problem, constraints and criteria for its solution. In turn, the user can use such a system as a means of automating the complex process of organizing reintegration tasks. This will allow:

– to relieve and streamline the work of public services related to issues of reintegration tasks;

– to weaken and, in the long term, eliminate the complete dependence of the solution of reintegration problems on the human factor;

– to increase the degree of objectivity of decisions made in the field of reintegration of temporarily occupied territories.

A decision is considered to be a reasonable set of actions on the part of a decision-maker aimed at an object of interest or a control system, which makes it possible to bring this object or system to the desired state or achieve a set goal.

Conclusion and further research

Thus, the obtained sequence of actions of the method of the process of supporting the adoption of managerial decisions by public authorities in the area of reintegration of temporarily occupied territories using geospatial information.

In future, by improving and detailing the proposed sequence of actions of the method, it is possible to form a more effective decision support system in the field of reintegration of the temporarily occupied territories.

The decision support system, which implements the proposed sequence of actions, issues a finite set of recommendations for solving the problem, constraints and criteria for its solution.

In turn, the user can use such a system as a means of automating the complex process of organizing reintegration tasks.

This will allow: to relieve and streamline the work of public services related to issues of reintegration tasks; to weaken and, in the long term, eliminate the complete dependence of the solution of reintegration problems on the human factor; to increase the degree of objectivity of decisions made in the field of reintegration of temporarily occupied territories.

REFERENCES

1. Merem, E.C. and Twumasi, Y.A. (2008), "Using Geospatial Information Technology in Natural Resources Management: The Case of Urban Land Management In West", *Africa. Scientific Journal Sensors (Basel)*, Vol. № 8 (2), pp. 607–619.
2. Shikhov, A.N., Cherepanova, E.S. and Ponomarchuk, A.I. (2014), *Geoinformation systems: the use of GIS technologies in solving hydrological problems*, a workshop, textbook. manual, Perm, 91 p.
3. Ališić, I., Mastelić Ivić, S., Tomić, H., and Tomljenović, M. (2014), "Decision Support System to Urban Land Readjustment", *6th International Conference on Engineering Surveying Prague, Czech Republic*, pp. 143-148.
4. Earth Observing System. High-Resolution Satellite Imagery, available at: <https://eos.com/ru/products/high-resolution-images/>
5. Pustovarov, V. (2020), "Construction of information technology for development of knowledge base on identification of urban structures on digital space and aerial photographs in the urban environment monitoring", *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 3, pp. 70–73, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.3.08>.
6. Bidyuk, P.I. and Korshevnyuk, L.O. (2010), *Design of computer information systems for decision support*, NTUU "KPI", Kyiv, 340 p.
7. Turko, D.A. (2009), "Taking into account the conditions of uncertainty and risk in the decision-making process in the field of high-tech production", *Open information and computer integrated technologies*, Vol. 43, pp. 180-187.
8. Terelyansky, P.V. (2009), *Decision support systems. Experience of design*, Volga State Techn. Univ, Volgograd, 127 p.
9. Gamzayev R., Tkachuk, M., and Shevkoopias D. (2020), "Knowledge-oriented information technology to variability management at the domain analysis stage in software development", *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 4, pp. 39–47, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.06>.

10. Hou, J., Yuan, Y., Peitao, W., Zhiyuan, R., and Xiaojuan, L. (2017), "Development of a decision support system for tsunami evacuation: application to the Jiyang District of Sanya city in China", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, pp.335-343, DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-17-335-2017>.
11. Galagan, V. I., Polishko, S. V., and Bondarchuk, S. V. (2018), "Application of decision support systems in the management of real estate military property of the Armed Forces of Ukraine" ["Zastosuvannya sistem pidtrimki priynyattya rishen v upravlinni neruhomim viyskovim maynom Zbroynih Sil Ukrayini"], *Informatization and project management of informatization of the Armed Forces*, Vol. 7 (4), pp. 74–79.
12. Kuhar M.A. (2017), "Algorithm of the functioning of the decision support system in land relations" ["Algoritm funktsionuvannya sistemi pidtrimki priynyattya rishen v zemelnih vidnosinah"], *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*, Vol. 7 (4), pp. 325–332.
13. Miller, T. (2019), "Explanation in artificial intelligence: Insights from the social sciences", *Artificial Intelligent*, pp. 1-38, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.artint.2018.07.007>.
14. Tripathi K. P. (2011), "Decision support system is a tool for making better decisions in the organization", *Indian Journal of Computer Science and Engineering (IJCSE)*, Vol. 2(1), P. 112–117.
15. Kurbatsky, A.N. and Cheushev, V.A. (1999), *Informational method of analysis and optimization in decision support systems*, Ed. Institute of Technical Cybernetics, Minsk, Belarus.

Received (Надійшла) 30.10.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.01.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Бутко Ігор Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, заступник генерального директора ДП «Центр державного земельного кадастру», Київ, Україна;

Ihor Butko – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Deputy gen. dire SE «State Land Cadaster», Kyiv, Ukraine; e-mail: Ihor.Butko@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2859-0351>.

Використання геопросторової інформації органами державної влади для підтримки прийняття управлінських рішень

I. M. Бутко

Анотація. У статті запропоновано використання геопросторової інформації щодо підтримки прийняття управлінських рішень органами державної влади у сфері реінтеграції тимчасово окупованих територій у Донецькій, Луганській областях та в Криму. Проаналізовані варіанти застосування систем підтримки прийняття рішень в управлінні нерухомим військовим майном Збройних Сил України, існуючі алгоритми та методи системи підтримки прийняття рішень в земельних відносинах. Надані пропозиції щодо підтримки прийняття управлінських рішень органами державної влади на основі даних дистанційного зондування Землі. Удосконалений алгоритм функціонування системи підтримки прийняття рішень при вирішенні задач реінтеграції тимчасово окупованих територій. Запропонована послідовність дій методу процесу підтримки прийняття управлінських рішень органами державної влади у сфері реінтеграції тимчасово окупованих територій з використанням геопросторової інформації, математичні конструкції теорії категорій і логіки предикатів. Наведений порядок реалізації послідовності дій даного методу. Удосконалюючи та деталізуючи запропонований метод, можливо сформулювати більш ефективну систему підтримки прийняття управлінських рішень органами державної влади з використанням геопросторової інформації.

Ключові слова: геопросторова інформація; дистанційне зондування Землі; орган державної влади; система підтримки прийняття рішення; теорія категорій; логіка предикатів; формалізація.

Использование геопространственной информации органами государственной власти для поддержки принятия управленческих решений

И. Н. Бутко

Аннотация. В статье предложено использование геопространственной информации по поддержке принятия управленческих решений органами государственной власти в сфере реинтеграции временно оккупированных территорий в Донецкой, Луганской областях и в Крыму. Проанализированы варианты применения систем поддержки принятия решений в управлении недвижимым военным имуществом Вооруженных Сил Украины, существующие алгоритмы и методы системы поддержки принятия решений в земельных отношениях. Представлены предложения по поддержке принятия управленческих решений органами государственной власти на основе данных дистанционного зондирования Земли. Усовершенствован алгоритм функционирования системы поддержки принятия решений при решении задач реинтеграции временно оккупированных территорий. Предложена последовательность действий метода процесса поддержки принятия управленческих решений органами государственной власти в сфере реинтеграции временно оккупированных территорий с использованием геопространственной информации, математические конструкции теории категорий и логики предикатов. Приведенный порядок реализации последовательности действий данного метода. Совершенствуя и детализируя предложенный метод, возможно сформировать более эффективную систему поддержки принятия управленческих решений органами государственной власти с использованием геопространственной информации.

Ключевые слова: геопространственная информация; дистанционное зондирование Земли; орган государственной власти; система поддержки принятия решения; теория категорий; логика предикатов; формализация.

Elena Tverytnykova, Yulia Demidova, Tatyana Drozdova

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

MANAGEMENT SYSTEM OF OCCUPATIONAL SAFETY AT UKRAINIAN ENTERPRISES: INTERNATIONAL AND EUROPEAN DIMENSION

Abstract. The international and European experience in creating and improving integrated systems in the field of occupational safety and health on the basis of research regulatory documents of the International Organization for Standardization, European standards, national standards of Ukraine, industry and methodical documents on management of occupational safety and health of oil and gas complex enterprises is overviewed. The implementation features of OHSAS 18001 and ISO 45001 international standards to create an integrated safety management system of professional activity have been studied. The ways of implementing the analyzed requirements in the industry safety standards of occupational activity of oil and gas complex enterprises of Ukraine are considered. A number of hazardous events related to occupational activity at the enterprises: industrial safety, technogenic safety, labour hygiene and safety, ecological safety, psychophysiological safety has been considered and a generalizing scheme of dangers and hazardous events has been created. A model of an integrated management system for occupational safety activities for oil and gas enterprises is proposed based on the involvement of scientific literature, regulatory documents using the structural-logical method, systematization and generalization, and methods of meaningful and comparative analysis. It is proved that the management system, based on the principles of the cyclical model of quality management by E. Deming should include such aspects as: quality and risk management, environmental management, occupational safety management, social responsibility and power management.

Keywords: occupational safety; oil and gas complex; integrated management system; occupational safety management and international standards.

Introduction

The European integration processes of the economic policy of modern Ukraine, as a result, reaching the international level, mastering competitive products, the spread of foreign economic relations with the countries of Europe and the world, undoubtedly influenced the creation of new approaches to the organization of professional activities in production, occupational safety and the integration of regulatory documents of Ukraine to the international and European level. All the above requires industrial enterprises to take into account all aspects that affect their success and to pursue policies in the field of quality management, ecology, aimed at harmonizing the relationship between producers, consumers, staff and society. The introduction of modern integrated management systems to increase competitiveness is gradually becoming an integral part of the functioning of Ukrainian enterprises. However, while quality management systems in accordance with the requirements of ISO 9001 international standard and environmental management in accordance with the requirements of ISO 14001 have become traditional, international standards for occupational safety are given less attention. Nevertheless, the issue of occupational safety is very urgent at industrial enterprises, and it concerns oil and gas enterprises. Undoubtedly, the oil and gas complex is the leading industry in Ukraine and has social, economic, commercial and political functions. Its prospects depend on the modernization of not only the material and technical base, but also the introduction of an effective management system based on the requirements of international standards. A key role in the creation of integrated management systems for enterprises of the oil and gas complex of Ukraine belongs to the problems of occupational safety.

Many publications are devoted to the peculiarities of creating integrated management systems. The direct model, allows the development and implementation of occupational safety management systems is proposed in [1]. The authors have proved that a system based on the method of strategic planning is more effective. The experience of optimizing and updating the management system of occupational safety and health of an industrial enterprise is reflected in [2]. In the publication it is proved that the developed system of occupational safety management makes it possible to reduce the number of emergencies and accidents. Publications allow tracing the peculiarities of the implementation of international and European standards [3]. The works [4-5] are devoted directly to the creation of integrated management systems for oil and gas enterprises. The greatest extent of the trend of the implementation of management systems is considered in [6], which outlines occupational safety and health at oil and gas enterprises and focuses on the creation of the safety management system of the operator of the gas transportation system. Peculiarities of implementation of new generation international standards are considered.

The analysis of the scientific literature on the identified problem allows us to state that there is no separate study on the need to implement a system of occupational safety management for oil and gas complexes.

The objective of the article is to study modern management systems of occupational activity and to develop a model of this system as an effective component of the integrated management system of oil and gas complex enterprise on the basis of scientific literature, regulatory documents using structural-logical method, systematization and generalization and methods of meaningful and comparative analysis.

Presentation of the main material

The creation and implementation of integrated management systems (IMS) began in the second half of the 1990s. International standards for quality management systems and environmental management systems became the organizational and methodological basis for the creation of such systems. Thus, at the first stage of IMS development, they were based on the documents of two management systems: quality and environment. And often the basis was the ISO 9000 quality management system.

For each particular enterprise the components of the IMS are determined taking into account the peculiarities of functioning, markets, consumer needs, etc. It is clear that in the conditions of European integration the quality management systems have gained special importance. In particular, almost all enterprises in Europe use quality management systems. In addition, most enterprises in Europe, both large and medium-sized, followed an environmental policy. Environmental management is actively being implemented in enterprises in the United States and the Asia-Pacific region.

To have their own environmental management system in accordance with the requirements of ISO 14001 international standards, the relevant documentary base, to conduct environmental audits has already become obligatory for industrial enterprises in most countries [7, p. 8-9].

In the late 1990s, there was a need to develop uniform requirements for management systems of occupational activities of industrial enterprises at the international level, which made it possible to certify management systems. However, the implementation of such systems was quite slow due to the lack of international regulatory documents. The availability of a sufficient number of national standards did not solve the problems with the certification procedure. The conducted analysis of regulatory base of documents on safety systems of occupational activities, including various regulations, recommendations, requirements, and specifications allows drawing some conclusions about the necessity of such a document (Table 1).

The OHSAS 18001 specification «Occupational Health and Safety Management Systems – Specifications» was proposed by the British Standards Institution and became the basis for the development of occupational safety management systems. Further refinements to the standard led to the creation of a new version of the standard – BS 18001: 2007, as a national standard in the UK. Japan, Ireland and South Africa also participated in the development of the document. The document defined the basic terms and concepts in occupational safety. European enterprises pay a great deal of attention to occupational health and safety issues and risk assessment. In addition, the following issues are necessarily considered: the effect of special hazards on occupational safety, salary, information about the terms of the employment contract, vacation, working hours, workspace requirements, and workplace safety regulations. Various special aspects related to the

occupational activity of disabled individuals have also been considered. The regulatory framework of the European Union in the field of occupational safety also includes a number of directives aimed at implementing measures to ensure a higher level of protection [8; 9; 10].

The standard developed by the American National Institute for Standardization (ANSI) – ANSI Z10-2012 Occupational Safety and Health Management Systems – is useful for analyzing the effectiveness of occupational safety management systems implementation. This regulatory document accumulates the current world trends of occupational safety and health policy. First of all, it focuses the attention of enterprises on such aspects that occur after the event, i.e. constant statistics of the number of accidents and of fatal accidents, missing work time due to injuries, work restrictions or working transfers and, as a result, the loss of working time. And then, secondly, the so-called «advanced» aspects, to include various activities aimed at preventing accidents. Despite the fact that this regulatory document has the status of a voluntary one, the United States entrepreneurs consider occupational safety issues to be an integral part of their activities [11].

Further activities of the international standardization organizations aimed at improving occupational safety issues led to the creation of the ISO 45001-2018 international standard «Occupational health and safety management systems - Requirements with guidance for use» in 2018 [12].

This document has a completely new structure, although some statements coincide with OHSAS 18001-2007. Gradually it will become a complete replacement of the former. The similarity in its structure with ISO 9001, ISO 14001, ISO 50001 basic standards, etc. makes it possible to integrate the new standard with other management systems [13; 14].

The standard is focused not only on eliminating hazards and minimizing risks, but also on the development and adoption of effective preventive measures. ISO organization has set a deadline of three years for the reorientation of enterprises with the requirements of the new regulatory document. The key provisions of ISO 45001, which are fundamentally different, are aimed at the process approach to incident and non-conformance management, identification of stakeholders, their needs and requirements, developing a plan for handling risks and opportunities, continual improvement of processes, verification of the system efficiency, taking measures, implementation of the concept of «Documented Information», which provides an electronic processing of information. Therefore, the policy of occupational safety has been formed by the countries of Europe and the world's leading concerns for decades and today is already a compulsory factor of occupational activity.

The standard is focused not only on eliminating hazards and minimizing risks, but also on the development and adoption of effective preventive measures. ISO organization has set a deadline of three years for the reorientation of enterprises with the requirements of the new regulatory document.

The key provisions of ISO 45001, which are fundamentally different, are aimed at the process approach to incident and non-conformance management, identification of stakeholders, their needs and requirements, developing a plan for handling risks and opportunities, continual improvement of processes, verification of the system efficiency, taking measures, implementation of the concept of «Documented Information», which provides an electronic processing of information.

Therefore, the policy of occupational safety has been formed by the countries of Europe and the world's leading concerns for decades and today is already a compulsory factor of occupational activity.

In Ukraine, occupational safety was regulated by DSTU OHSAS 18001: 2006 and DSTU OHSAS 18002: 2006 documents, which are respectively identical translations of OHSAS 18001: 1999 specification. In 2010, ДСТУ (DSTU) OHSAS 18001: 2010

«Occupational health and safety management systems – Specification (OHSAS 18001: 2007, IDT)» was adopted, based on the new version of OHSAS 18001:2007.

The main provisions reflect aspects such as the implementation of the occupational safety and health policy and verification and control actions, risk assessment and its management, definition of the structure, duties and responsibilities, analysis by the administration and improvement and maintenance of the occupational safety and health management system. It should be emphasized that the recent document is valid until 2022. Considering the international recommendations, the DSTU ISO 45001: 2019 was created, which is an identical translation of ISO 45001: 2018 (IDT) international standard [15].

In addition, a number of documents, summarized in the Table 2, were introduced directly for oil and gas enterprise complexes.

Table 1 – The regulatory base of the documents of occupational safety management of the oil-and-gas complex enterprises
(the table is developed by the authors on the basis of [7–20])

International standards	European standards	National standards of Ukraine	Normative documents of enterprises
OHSAS 18001:2007 Occupational Health and Safety Management Systems. Requirements	Directive 89/391/CEC On the implementation of measures to encourage improvements in the safety and health of workers at work	DSTU GOST 12.0.230:2008 System of labor safety standards. Occupational safety management systems. general requirements	OST 22-1612-84. Occupational safety management system. General Provisions
ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems	Directive 89/654/CEC Regarding the minimum requirements for safety and health in work areas	DSTU 2293-99 Occupational Health. Terms and definitions of basic concepts	SSBT OCT 5.0384-84. SSBT. Determining the level of occupational safety. Substantive provisions
ISO/TS 29001:2010 Quality Management Systems. Requirements for organizations supplying products and services in the oil, petrochemical and gas industries	Directive 89/655/CEC About the minimum requirements for safety and health protection of workers at the workplace when using work equipment	DSTU 2156-93 Safety of industrial enterprises. Terms and definitions	OST 39-022-85 System of labor safety standards of the oil industry. Dangerous and harmful production factors at oil industry facilities. Classification
ISO/AWI 7101 Health Care Quality Management System Standard [under development]	Directive 89/656/CEC On the minimum requirements for health and safety when employees use personal protective equipment	DSTU 3273-95 Safety of industrial enterprises	OST 39-136-82. System of labor safety standards of the oil industry order of implementation of standards
ISO 26000:2010 Guidance on social responsibility	Directive 90/270/CEC About the minimum requirements of safety and health when working with screen devices	DSTU EN ISO 12100:2016 Safety of machines. General principles of design. Risk assessment and risk reduction	SOU 49.5-30019801-115:2014 Rules of technical operation of main gas pipelines
ISO 19011:2018 Guidelines for auditing management systems	Directive 90/394/CEC Regarding the protection of workers from the risks associated with exposure to carcinogens at work	DSTU EN 954-1:2003 Safety of machines. Security elements of control systems. 1. General principles of design	SOU 49.5-30019801-117:2014 The procedure for developing labor standards in PAT Ukrtransgaz
ILO-OSH 2001 Guidelines on occupational safety and health management systems	Directive 92/58/CEC About the minimum requirements for ensuring safety and / or hygiene signs in the workplace	DSTU EN 614-1:2018 Safety of machines. Ergonomic design principles. 1. Terminology and general principles	SOU 49.5-30019801-116:2014 Labor rationing system PAT Ukrtransgaz
	Directive 2000/43/EC Regarding the implementation of the principle of equality of persons regardless of racial or ethnic affiliation	DSTU EN 529:2006. Respiratory protection. Recommendations for selection, use, care and maintenance	SOU 49.5-30019801-121:2014 Occupational Health. The procedure for admitting employees of third-party organizations to perform work on sites PAT Ukrtransgaz
	Directive 92/104/CEC On minimum requirements for improving the safety and health of workers of mining enterprises with underground and open pit mining	DSTU EN ISO 10075-2:2004. Ergonomic principles for determining mental workload. 2. Principles of design	

International standards	European standards	National standards of Ukraine	Normative documents of enterprises
	Directive 1999/92/EC On minimum requirements for improving the safety and health of workers exposed to potential hazards in explosive atmospheres	DSTU GOST 12.4.041:2006 Means of individual respiratory protection are filtering. General technical requirements	
	Directive 92/91/EEC Regarding the minimum requirements for improving the level of safety and health of workers at mining enterprises, where raw materials are extracted through wells	DSTU 4462.0.02:2005. Conservation. A set of standards in the field of waste management. general requirements	
	Directive 2000/78/EC Which establishes a general framework for equal treatment in the field of employment and professional activity	DSTU 4312:2012. Conservation. A set of standards in the field of waste management. general requirements	
	Directive 2003/88/EC About some aspects of the organization of working time	DSTU 4933:2008. Conservation. A set of standards in the field of waste management. general requirements	
	BS EN 16348:2013 Gas infrastructure. Safety Management System (SMS) for gas transmission infrastructure and Pipeline Integrity Management System (PIMS) for gas transmission pipelines	DSTU OHSAS 18001:2010 «Occupational health and safety management systems – Specification (OHSAS 18001:2007, IDT)	
	BS 18004:2008 Guide to achieving effective occupational health and safety performance	DSTU 7238:2011. System of labor safety standards. Means of collective protection of workers. General requirements and classification .	
		DSTU 7239:2011 System of labor safety standards. Personal protective equipment. General requirements and classification	

Table 2 – The Normative and methodological documents of Ukrainian oil and gas enterprises complex in the field of occupational safety

Legal acts of labor protection	Methodical documents
NPAOP 11.1-1.01-08 Safety rules in the oil and gas industry of Ukraine	Labor protection at the enterprise. A practical guide to the investigation and registration of accidents and occupational diseases
NPAOP 11.1-1.07-90. Safety rules for the operation of automation tools and systems in the gas industry	Methodical instructions on sanitary protection of reservoirs from oil pollution 23.04.1976
NPAOP 11.1-1.11-86 Safety rules for the operation of gas processing plants	MOT-SUOT 2001 Guidelines for occupational safety management systems (ILO-OSH 2001)
NPAOP 11.1-5.02-86 Instruction on safety of loading works during exploration and development of oil and gas fields on the continental shelf 51-01-22-86	
NPAOP 11.1-1.15-13 Safety rules for oil and gas exploration and development in the Black and Azov Seas	
NPAOP 23.2-1.01-76 Safety rules during operation of oil treatment plants at oil industry enterprises	
NPAOP 23.2-1.10-73 Safety rules for the operation of oil and gas refineries	
NPAOP 23.2-3.26-13 Norms of free distribution of special clothes, special footwear and other means of individual protection to workers of the oil refining industry	

Based on the normative documents, integrated management systems have been developed and implemented at some enterprises in Ukraine. In

particular, at Zaporizhstal enterprise the OHSAS 18001: 2007 policy and ILO OHSAS 2001 (the requirements of the International Labour Organization on arrangement

of working places and working conditions) are implemented simultaneously. The integrated management systems are implemented at such enterprises as JSC «AZOT» of chemical profile, PJSC «Odeskabel», etc. [16; 17]

The implementation of integrated management systems at oil and gas enterprises began in the early 2000s. Along with the traditional quality and environmental management systems in 2012. JSC «Ukrtransgas» introduced a certified safety management system (OHSAS 18001: 2007).

Public joint-stock company «Ukrnafta» introduced a certified integrated management system based on subsystems designed in accordance with the requirements of ISO 9001, ISO 14001. The policy in the field of occupational safety is pursued in accordance with the Law of Ukraine «On labour protection» and OHSAS 18001: 2007 international standards in the field of occupational safety and health [18].

The modern integrated quality management system, occupational safety and health in accordance with the requirements of ISO 9001: 2015 and ISO 45001: 2018 standards is developed, documented and implemented in the joint-stock company Ukrainian Institute For Design of Refining And Petrochemical Plants «UKRNAFTOKHIMPROEKT» (shortly – JSC «UKRNAFTOKHIMPROEKT»).

Continuous improvement of the system makes it possible for the enterprise to identify and review risks, improve working conditions, increase the level of occupational safety, reduce the risks of industrial injuries and professional diseases [19].

The enterprises of the oil and gas sector are represented by a rather complex set of technical facilities. It is necessary to take into account various objects of major hazard. There is a real danger of technogenic emergencies, which is a threat to occupational activity and human health (Fig. 1).

The process of occupational activity is carried out in certain conditions of the production environment, which are characterized by a set of elements affecting the ability to work and the state of human health. Abnormal situations are associated with a particular type of human activity, and each of them is necessarily accompanied by human exposure to hazardous and harmful factors of production. It is necessary to take into account that working capacity is also influenced by technological processes, equipment that determines sanitary and hygienic characteristics of working environment. The reasons for dangerous situations may be technical. These include - structural deficiencies, insufficient reliability of production facilities, vehicles, lack of design documentation, incompliance with safety requirements of the technological process, adverse weather conditions, increased concentration of harmful substances in the air of the working area; the existence of harmful radiation, unsatisfactory lighting, increased noise and vibration levels, etc. It is important to consider organizational causes: unsatisfactory functioning, imperfect or lack of safety management system of occupational activity, the absence or low-quality medical examination, violations of safety requirements when operating vehicles, failure to

use collective or individual protection means. Psychophysiological reasons connected with the unfavourable feature of the human factor, incompliance of anatomical and physiological and psychological features of the human organism with working conditions are obligatory [20].

In addition, attention should be paid to new disease tendencies related to these modern strenuous work schedules. The research has been carried out in European countries on new occupational diseases to which attention should be drawn. The spread of sedentary work or long periods of standing (the automation of work and the use of computers leads to muscle-skeleton disorders and puts new demands on ergonomic conditions in the workplace. Mental health disorders are widespread today and are a consequence of stress and overwork related to flexible working hours. We should consider that both stress and musculoskeletal disorders lead to diseases such as hypertension, peptic ulcer disease and cardiovascular disease, among others.

Thus, taking into account the previous analysis of international and European experience in the creation and implementation of integrated management systems it is necessary to conclude that to achieve the required level in the field of occupational safety and health in Ukraine it is essential to take into account current global developments. This allows Ukrainian enterprises to secure both a competitive edge and sustainable development of enterprises and improve their occupational safety. It is necessary to focus on the more worthy of integration ISO 45001 international standard, adopted in Ukraine as identical. However, when creating an integrated safety management system of professional activities of oil and gas complex enterprises, given the list of hazardous situations all aspects should be taken into account.

Basing on the recommendations of ISO 72 Guide on the development of standards for management systems and methodology for creating integrated systems, a structural logical scheme of the integrated management system model for the safety of occupational activities for oil-and- gas enterprises is proposed. It is a combination of PDCA (PLAN- DO-CHECK-ACT) cyclic quality management model by E. Deming and various adapted subsystems. The organic interconnection of all the components of the integrated management system is supported by the involvement of the process and system approaches to management [5] (Fig. 2).

The subsystems of quality management on the basis of DSTU ISO 9001: 2015, quality management at the enterprises of oil, petrochemical and gas industry of the region in accordance with the requirements of DSTU ISO/TS 29001: 2010 «Quality Management Systems. Requirements for organizations supplying products and services in the oil, petrochemical and gas industries (ISO / TS 29001: 2010, IDT)» and environmental management based on DSTU ISO 14001: 2015 have become the organizational and methodological basis of the integrated management system [21].

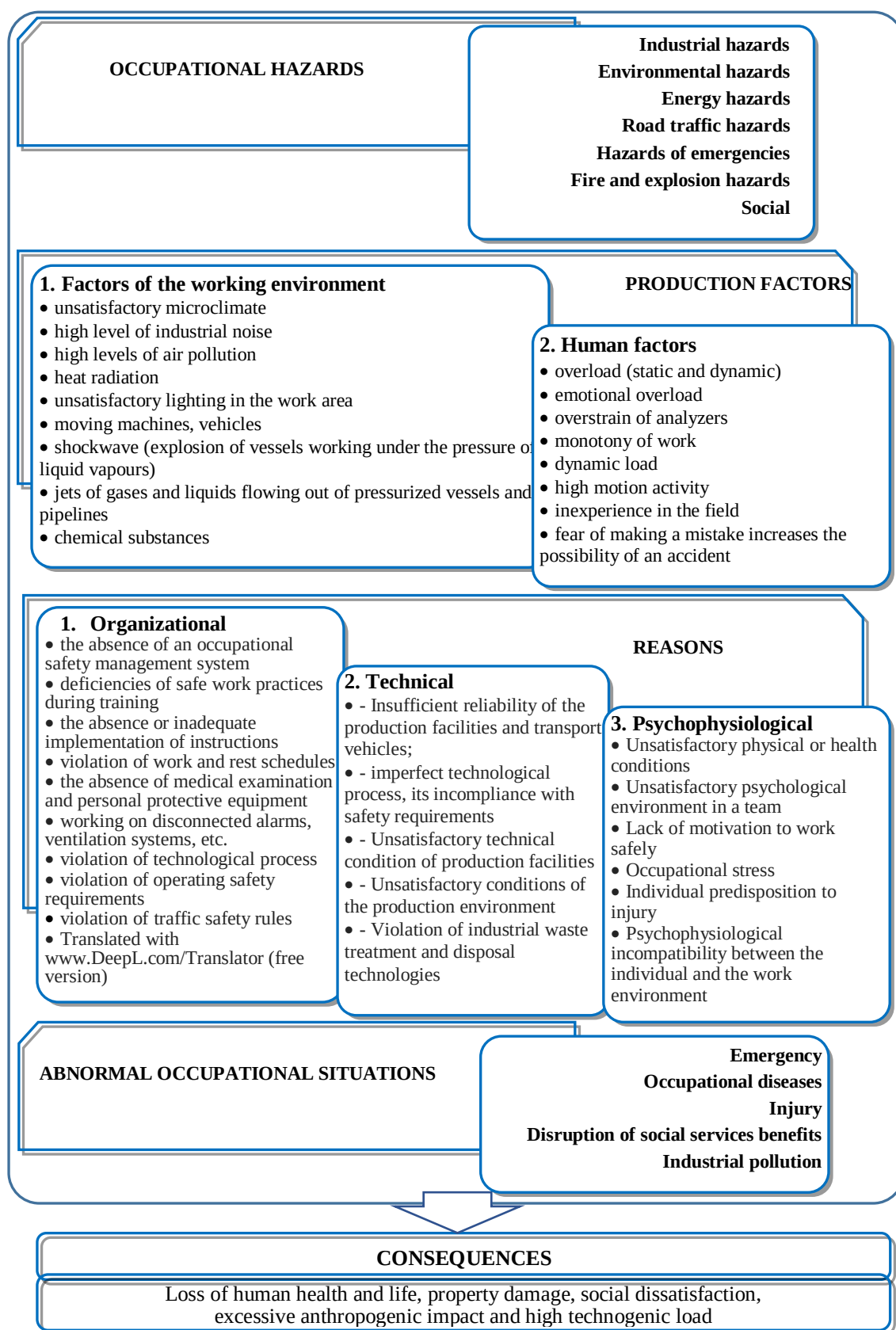


Fig. 1. The structural-logical scheme of dangerous situations of oil and gas complex enterprises

An industrial safety subsystem based on DSTU OHSAS 18001: 2010 as well as ISO 45001: 2018, which are necessary to support directly the occupational health and safety management system and are based on risk-based thinking.

The national standard of Ukraine DSTU ISO 31000: 2018 «Risk Management. Principles and settings» (ISO 31000: 2018, IDT) became the basis for the organization of the risk management system. The involvement of these documents contributes to the

modern risk management concept. This normative document is not specific to a particular industry and is

recommended for use in the creation of integrated management systems [22].

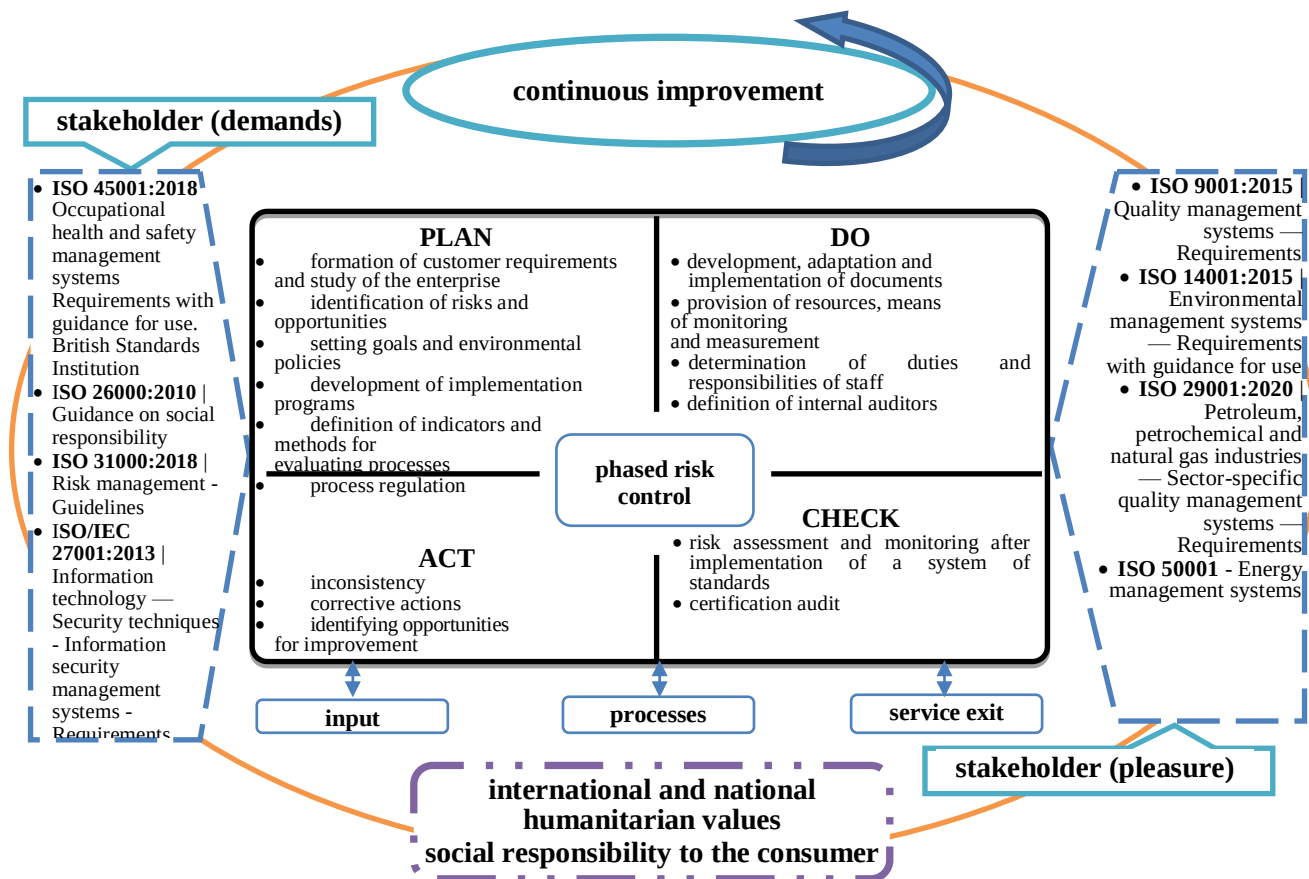


Fig. 2. The structural - logical scheme of the integrated management system model of occupational activity safety for oil and gas complex enterprises

The social responsibility subsystem is based on the regulatory requirements of ISO SA 8001: 2008 «Social Accountability 8000» and ISO SR 26000 «Social responsibility of organizations», which reflect the provisions of the International Labour Organization Convention and the Universal Declaration of Human Rights and the United Nations Convention on the Rights of the Child. Their involvement reduces the risks of violating social regulations, promotes the development and implementation of social security and is an effective means for the practical realisation of moral and ethical standards. In addition, the interests of environmental protection and economical use of resources are taken into account [23].

Some differences in energy efficiency policies in Ukraine and European countries, the United States of America cause the attraction of ISO 50001 «Energy Management System. Application requirements and guidelines», the integrated management system standard. Advanced countries are focused on an integrated approach, which considers energy efficiency in a complex with ecology and competitiveness aspects [24].

Conclusions

To sum up, the study of international and European experience of creating and improving

occupational safety management systems leads to the conclusion about the necessity and possibility of developing such systems for Ukrainian enterprises. The analysis of initiatives to implement such systems at the enterprises of oil and gas complex of Ukraine shows that this process is proceeding rather slowly. The adoption of national standard based on the requirements of ISO 45001 international standard is important for modern policy of safety of occupational activity and human health protection of the national industrial complexes.

The analysis of hazards and dangerous situations, connected with oil and gas industry, reinforces these conclusions.

The formation of an integrated occupational safety management system takes place in four main stages, such as planning, implementation, verification and adjustment.

An indispensable component of the process of formation of an integrated management system is the use of the process and system approach in a complex.

The proposed model of integrated occupational safety management system includes such subsystems as: quality and risk management, environmental management, social responsibility, occupational safety, continuous improvement and enhancement.

REFERENCES

1. Alekina, E.V., Ovchinnikov, K.A. and Minina, Y.I. (2019), Conceptual model of professional risk management, *GCPMED 2018 – International scientific conference global challenges and prospects of the modern economic development*, pp. 1561–1569, DOI: <https://doi.org/10.15405/epsbs.2019.03.159>.
2. Gembalska-Kwiecien, A. and Skotnicka-Zasadzien, B. (2018), “Innovation and optimization of the occupational health and safety management system in a selected industrial enterprise – a case study”, *6th International Conference on Innovation Management, Entrepreneurship and Sustainability (IMES)*, pp. 347–356.
3. Ginzburg, M.D., Kovalenko, S.E. and Klyun, A.M. (2016), “Standarty na systemy keruvannja: mizhnarodnyj ta jevropejskij dosvid i jogho zaprovadzhennja v Ukraini” [Standards for control systems: international and European experience and its implementation in Ukraine], *Standardization, certification, quality*, No. 1, pp. 7–16.
4. Ginzburg, M.D. and Klyun, A.M. (2019), “Postijne polipshuvannja perekladiv jevropejskikh standartiv jak zasib zabezpechuvaty jakistj roboty ghazotransportnoji systemy Ukrainy” [Constant improvement of translations of European standards as a means to ensure the quality of the gas transmission system of Ukraine], *Standardization, certification, quality*, No. 1, pp. 10–24.
5. Tverytnykova, E., Drozdova, T. and 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: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.06>.
6. Kostanyan, V.R. (2018), “Uprovadzhennja mizhnarodnykh ta jevropejskikh vymogh do system keruvannja bezpekoju v standarty operatora ghazotransportnoji systemy Ukrainy” [Introduction of international and European requirements to safety management systems in the standards of the gas transmission system operator of Ukraine], *Standardization, certification, quality*, No. 5 (112), pp. 16–25.
7. Morteza, Rajab Zade, and Zaloga, V.A. and Ivchenko, A.V. (2018), “Razrabotka ynteghryrovannukh system upravleniya na baze mezhdunarodnykh standartov: metodologicheskiye osnovy: monografija” [Development of integrated control systems based on international standards: methodological foundations, monograph], Sumy, 114 p.
8. (2003), *Manual on Occupational Safety and Health Management Systems*, ILO SOUT – 2001, ILO-OHS 2001, Geneva: ILO, 28 p., available at: <https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public>.
9. (2007), *OHSAS 18001: 2007 «Systemy menedzhmenta professyonaljnogho zdorovjja y bezopasnosti – Trebovanyja»* [OHSAS 18001:2007 «Occupational health and safety management systems – Requirements»], CERT Management with PEC Intercertifica-TUV together with TUV Thüringen, 34 p.
10. (2010), *OHSAS 18001: 2010 «Systemy upravlinnja okhoronoju praci – vymoghy»* (OHSAS 18001: 2007, IDT). DNAOP. Zakonodavcha baza [OHSAS 18001:2010 «Occupational health and safety management systems – Requirements» (OHSAS 18001:2007, IDT). DNAOP. Legislative base], available at: https://dnaop.com/html/34112/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_OHSAS_18001_2010.
11. (2012), *Standart ANSI Z10-2012 nadaje plan stvorennja systemy upravlinnja EHS* [ANSI Z10-2012 Standard Provides the Blueprint to Create an EHS Management System], available at: <https://www.assp.org/standards/standards-topics/osh-management-z10>.
12. (2018), *Publikacija standartiv BSI. BS ISO 45001: 2018. Systemy upravlinnja okhoronoju praci ta tekhnikoju bezpeky Vymoghy iz vkazivkamy shhodo vykorystannja. Brytanskyj instytut standartyzaciji* [BSI Standards Publication. BS ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems Requirements with guidance for use. British Standards Institution], 42 p.
13. (2016), *ISO 9001: 2015 «Systemy upravlinnja jakistju - vymoghy»* [ISO 9001:2015 «Quality management systems – Requirements»], Kyiv, 30 p.
14. (2016), *DSTU ISO 14001: 2015 «Systemy ekolohichnoho upravlinnja - Vymohy z kerivnytstvom shhodo vykorystannja (ISO 14001: 2015, IDT)* [DSTU ISO 14001:2015 «Environmental management systems – Requirements with guidance for use (ISO 14001:2015, IDT)»]. Kyiv, 37 p.
15. (2020), *Nakaz 157 vid 06.08.2020 Pro vprovadzhennja nacionaljnogho standartu DSTU ISO 45001:2019 (ISO 45001:2018, IDT) v dijalnistj NAAU* [Order № 157 of 06.08.2020 On the implementation of the national standard DSTU ISO 45001: 2019 (ISO 45001: 2018, IDT) in the activities of NAAU], available at: https://naau.org.ua/wp-content/uploads/2020/08/Nakaz_157od_vid-06.08.2020.pdf.
16. (2020), *Oficijnyj sajт PAT AZOT* [Official site of PAT AZOT], available at: <https://opendatabot.ua/c/203826>.
17. (2020), *Oficijnyj sajт PAT Odeskabelj* [Official site of PAT Odeskabelj], available at: <https://odeskabel.com/ua/>.
18. Levandovskii, A.S. (2019), *Polityka u sferi okhorony praci PAT UKRNAFTA. Zaghaljni polozhennja* [Policy in the field of labor protection of PAT UKRNAFTA. Terms], available at: <https://www.ukrnafta.com/data/About-Company/dod2.pdf>.
19. Levandovskii, A.S. (2019), *Polityka u sferi integhrovanoji systemy menedzhmentu jakosti profesijnoji bezpeky ta okhorony zdorovja* [Policy in the field of integrated quality management system of occupational safety and health], ATC UKRNAFTOKHIMPROEKT, available at: <http://www.unxp.com.ua/politika.pdf>.
20. Demidova, Y.E. and Pavlenko, T.S. (2015), *Orghanizacijni aspekty rozsliduvannja nebezpechnykh situacij na vyrobnyctvi v systemi upravlinnja ta osvity* [Organizational aspects of the investigation of dangerous situations at work in the system of management and education], Kharkiv, 278 p.
21. (2020), *ISO 29001: 2020 Naftova, naftokhimichna ta ghazova promyslovistj. Specialjni ghaluzi upravlinnja systemamy jakosti. Vymoghy do orghanizacij, shho postachajutj produkciju ta poslughy* [ISO 29001:2020 Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Sector-specific quality management systems – Requirements for product and service supply organizations], available at: <https://www.iso.org/ru/standard/67773.html>.
22. (2019), *DSTU ISO 31000:2018. Menedzhment ryzykiv. Pryncypy ta nastanovy* [DSTU ISO 31000: 2018. Risk management. Principles and guidelines], Kyiv, 32 p.
23. (2010), *ISO 26000: 2010 Kerivnyctvo z socialjnoji vidpovidalnosti* [ISO 26000:2010 Guidance on social responsibility], available at: <https://www.iso.org/iso-26000-social-responsibility.html>.

24. (2018), ISO 50001: 2018. *Systemy energhomenedzhmentu – Vymoghy* [ISO 50001:2018. Energy management systems – Requirements], available at: <https://www.iso.org/standard/69426.html>.

Received (Надійшла) 26.10.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.01.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Тверитникова Олена Євгенівна – доктор історичних наук, доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Elena Tverytnykova – Doctor of Historical Sciences, Associate Professor Department of Information and Measuring Technologies and Systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: tveekhpi@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6288-7362>.

Демідова Юлія Євгенівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри педагогіки і психології управління соціальними системами, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Yulia Demidova – Candidate of Technical Sciences, Assistant professor of pedagogy and psychology of social systems management Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: dem-ula@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8295-5972>.

Дроздова Тетяна Василівна – старший викладач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

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>.

Система менеджменту безпеки професійної діяльності на підприємствах України: міжнародний та європейський вимір

О. Є. Тверитникова, Ю. Є. Демідова, Т. В. Дроздова

Анотація. Узагальнено міжнародний та європейський досвід зі створення та удосконалення інтегрованих систем в галузі безпеки праці та охорони здоров'я на основі дослідження нормативних документів Міжнародної організації стандартизації, європейських стандартів, національних стандартів України, галузевих та методичних документів з управління охороною праці та виробничої безпеки підприємств нафтогазового комплексу. Вивчено особливості впровадження міжнародних стандартів серії OHSAS 18001 та ISO 45001 щодо створення інтегрованої системи менеджменту безпеки професійної діяльності. Розглянуто шляхи впровадження проаналізованих вимог у галузеві стандарти безпеки професійної діяльності підприємств нафтогазового комплексу України. Розглянуто низку небезпечних подій, пов'язаних з професійною діяльністю на підприємствах: промислова безпека, техногенна безпека, гігієна та безпека праці, екологічна безпека, психофізіологічна безпека та створено узагальнюючу схему небезпек та небезпечних подій. Запропоновано модель інтегрованої системи менеджменту безпеки професійної діяльності для підприємств нафтогазового комплексу на основі залучення наукової літератури, нормативно-правових документів з застосуванням структурно-логічного методу, систематизації та узагальнення та методів змістовного та порівняльного аналізу. Доведено, що система менеджменту, засновуючись на принципах циклічної моделі управління якістю Е. Демінга повинна включати такі аспекти, як: управління якістю та ризиками, екологічне управління, менеджмент безпеки професійної діяльності, соціальна відповідальність, енергоменеджмент.

Ключові слова: промислова безпека; нафтогазовий комплекс; інтегрована система управління; менеджмент безпеки професійної діяльності; міжнародні стандарти.

Система менеджмента безопасности профессиональной деятельности на предприятиях Украины: международный и европейский опыт

Е. Е. Тверитникова, Ю. Е. Демидова, Т. В. Дроздова

Аннотация. Обзор международный и европейский опыт по созданию и совершенствованию интегрированных систем в области безопасности труда и охраны здоровья на основе исследования нормативных документов Международной организации стандартизации, европейских стандартов, национальных стандартов Украины, отраслевых и методических документов по управлению охраной труда и производственной безопасности предприятий нефтегазового комплекса. Изучены особенности внедрения международных стандартов серии OHSAS 18001 и ISO 45001 по созданию интегрированной системы менеджмента безопасности профессиональной деятельности. Рассмотрены пути внедрения проанализированных требований в отраслевые стандарты безопасности профессиональной деятельности предприятий нефтегазового комплекса Украины. Рассмотрен ряд опасных событий, связанных с профессиональной деятельностью на предприятиях: промышленная безопасность, техногенная безопасность, гигиена и безопасность труда, экологическая безопасность, психофизиологическая безопасность и создан обобщающую схему опасностей и опасных событий. Предложена модель интегрированной системы менеджмента безопасности профессиональной деятельности для предприятий нефтегазового комплекса на основе привлечения научной литературы, нормативно-правовых документов по применению структурно-логического метода, систематизации и обобщения и методов содержательного и сравнительного анализа. Доказано, что система менеджмента, основываясь на принципах циклической модели управления качеством Э. Деминга должна включать такие аспекты, как: управление качеством и рисками, экологическое управление, менеджмент безопасности профессиональной деятельности, социальная ответственность, энергоменеджмент.

Ключевые слова: промышленная безопасность; нефтегазовый комплекс; интегрированная система управления; менеджмент безопасности профессиональной деятельности; международные стандарты.

Methods of information systems synthesis

УДК 004.82

doi: 10.20998/2522-9052.2021.1.07

О. Ю. Іохов, В. Г. Малюк, О. М. Сальніков, О. О. Новикова

Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ОНТОЛОГІЇ ЗАДАЧІ ВИБОРУ ДЛЯ ОПИСУ ПРОЦЕСІВ ВЗАЄМОДІЇ СУБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ

Анотація. У статті доведено, що потребує вирішення проблема наявності протиріччя між збільшенням обсягу інформації, необхідної для прийняття рішень у сфері управління силами охорони правопорядку, і постійною вимогою щодо скорочення часу на її обробку в інформаційно-аналітичних системах. **Мета статті** полягає у підвищенні ефективності прийняття рішень в системі управління військового командування в умовах надзвичайного стану шляхом застосування онтології задачі вибору на основі сукупності семантично значущих результатів. **Результати дослідження.** Проаналізовані шляхи удосконалення механізмів інформаційно-аналітичного забезпечення системи управління військового командування в умовах надзвичайного стану. Використаний підхід до застосування онтології задачі вибору для прийняття рішень у сфері управління силами охорони правопорядку із застосуванням процедури інтеграції інформаційних ресурсів на основі бінарного відношення часткового порядку. Онтологічні системи, як результат зворотного відображення натуральних систем, забезпечують коректне агрегування різних тематичних процесів за рахунок формування структурованої сукупності інформаційних об'єктів-концептів предметної області, які визначаються як єдиний тип даних. За рахунок цього визначається онтологічний характер інтерпретації семантики контекстів об'єктів-концептів, які використовуються в процесі розв'язання задач в системі управління військового командування в умовах надзвичайного стану.

Ключові слова: інформаційно-аналітична система; онтологія; таксономія; множина тавтологій; бінарне відношення часткового порядку.

Вступ

Постановка проблеми. Аналіз воєнно-політичної обстановки, рівень воєнної небезпеки та ступень воєнної загрози національній безпеці України вимагає удосконалення системи управління силами охорони правопорядку у напрямі впровадження механізмів підвищення стійкості управління та обґрунтованості рішень, що приймаються в умовах інформаційного впливу противника.

Одним із напрямів вирішення зазначеного завдання є удосконалення структури функціонування органів інформаційного забезпечення у сфері управління силами охорони правопорядку і координації їх взаємодії. У контексті зазначеного виникає потреба у забезпеченні спроможності підтримки інформаційно-розрахункової й аналітичної діяльності посадових осіб в умовах підвищення складності завдань, що вирішуються органами управління військового командування в умовах надзвичайного стану різних рівнів та різноманітності й нестандартності ситуацій, за результатами аналізу яких приймаються рішення.

Розв'язання цих задач стикається з необхідністю вирішення низки проблем, які пов'язані з інформаційним забезпеченням сучасних систем управління, основними з яких є такі [1]:

- різноманітність й незв'язаність форм документів, велика кількість неформалізованої інформації, що циркулює в інформаційно-аналітичних системах (ІАС);

- відсутність єдиних класифікаторів, словників і уніфікованої системи документів, що

унеможливорює реалізацію інформаційної та термінологічної сумісності баз даних;

- наявність великої кількості джерел інформації, їх різноманітність і територіальна розподіленість.

Особливої актуальності ці проблеми набувають в контексті розгляду різноманітності інформаційних даних, що циркулюють в системі управління військового командування в умовах надзвичайного стану.

Так, зазначені ресурси представлені алгоритмами, математичними моделями та документами (масивами документів), які можуть включати документи бойового управління (бойові накази, розпорядження, донесення, зведення), нормативні документи (накази, норми, штати), довідкову інформацію (класифікатори, словники термінів), облікову інформацію (анкети, картотеки), науково-технічну інформацію (друковані видання, звіти про науково-дослідні і дослідно-конструкторські роботи), інформацію, яка циркулює в автоматизованих системах (бази даних, файли, повідомлення) та інші масиви інформації (карти, фонди, схеми, плакати, окремі файли та ін.) [2].

Таким чином, потребує вирішення проблема наявності протиріччя між збільшенням обсягу інформації, необхідної для прийняття рішень у сфері управління силами охорони правопорядку, і постійною вимогою щодо скорочення часу на її обробку в ІАС.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Одним із рішень зазначеної проблеми є впровадження ІТ-технологій, інструменти яких забезпечують підтримку прийняття рішень на

основі лінгвістично-семантичного аналізу інформації про області, предмет, процес «формальних» знань і здійснення їх інтеграції з неформальними знаннями групи осіб (керівників, фахівців, експертів), які приймають рішення. Зазначені технології повинні забезпечити [3]:

- концентрацію всієї необхідної для прийняття рішень інформації в єдиному інформаційному середовищі, підвищення її якості (повноти та достовірності), швидкий і ефективний доступ до неї осіб, які приймають рішення (ОПР);

- автоматичне виділення критично важливої інформації, яка характеризує якісну зміну ситуації в предметній області;

- об'єднання аналітичних засобів системи і інтелектуальних можливостей осіб, які приймають рішення, і експертів, що входять у ІАС у якості її активних елементів;

- накопичення колективного досвіду вирішення проблем, використання його для вирішення нових проблем, забезпечення наступності в управлінні;

- надання ОПР і експертам засобів підтримки процедур колективного вироблення і прийняття рішень, а також широкого спектра інструментів, необхідних для створення моделей розв'язуваних проблем;

- надання особам, які приймають рішення, і експертам інформації та результатів моделювання у вигляді інтерактивних візуально-орієнтованих динамічних моделей (системи візуальних образів) вирішуваних проблем.

Висока ефективність функціонування ІАС може бути забезпечена за рахунок здійснення інформаційного забезпечення в рамках єдиного інформаційного простору, а також інтеграції у нього усіх програмно-апаратних засобів.

Зазначене середовище має собою являти гіперплощину, в межах якої здійснюється збір, формування, розповсюдження і використання інформації в інтересах відповідних користувачів (логічних об'єктів інформаційної взаємодії) згідно із застосованою методологією обробки інформаційних потоків [1].

При цьому маєтись на увазі використання загальноприйнятих систем формування та застосування інформаційних ресурсів, мов спілкування, технологій доступу, обміну і переробки інформації, комунікацій, а також єдиних структур інформаційних ресурсів, банків даних і знань, систем управління ними [4].

Формування сукупності семантично значущих результатів у процесі діяльності осіб, які приймають рішення, на основі аналізу і обробки масивів інформації, що пов'язані з об'єктами управління, в рамках єдиного інформаційного простору дозволить суттєво підвищити ефективність управління.

Таким чином, **мета статті** полягає у підвищенні ефективності прийняття рішень в системі управління військового командування в умовах надзвичайного стану шляхом застосування онтології задачі вибору на основі сукупності семантично значущих результатів.

Основний матеріал

Вирішення будь-якої проблеми у задачах аналітичного оцінювання полягає у виборі певних рішень з врахуванням ситуації, що склалася, з деякого набору допустимих (типових, стандартних) керуючих впливів.

Створення розподіленого програмно-інформаційного середовища, що забезпечує в реальному часі комплексну багаторівневу обробку потоків малоінформативних і часом суперечливих первинних відомостей про прояви об'єктів доцільно здійснити на основі застосування онтологічних систем [5-7]. Це дозволить реалізовувати досить повний опис множини станів кожного етапу вирішення задач в термінах предметної області та забезпечить проведення контекстного аналізу проблеми, оцінки стану, формування ідеї розв'язання і на кінцевій стадії відокремлення і формулювання складників прикладних задач ситуаційного управління у термінах прикладних областей їх постановки.

На підставі зазначеного, упорядковану множину тавтологій $\tilde{T}$ [8], що представляють процес вирішення прикладної задачі у вигляді взаємодії натуральних систем NS , можна представити орієнтованим графом G без циклів [9].

Тобто, якщо елементами множини тавтологій $\tilde{T}$, що представляє процес вирішення прикладної задачі у вигляді взаємодії натуральних систем є множина тавтологій $\tilde{T}'$, то кожна вершина графа G може бути представлена у вигляді орієнтованого графа G' без циклів.

Будь-яку таксономію можна представити навантаженим дводольним графом [9]

$$G = (V_1 \cup V_2, E), \quad (1)$$

де $V_1 \cap V_2 = \emptyset$ (вершини з V_1 розмічені іменами предикатів, а вершини з V_2 – іменами аргументів); E – множина дуг (ребер).

Дуги графа з'єднують вершини, що помічені іменами предикатів, з вершинами, які помічені іменами аргументів. Висловлювання ж формуються на основі композиції вершин, які є інцидентними до одного ребра. Алгоритм формування тавтологій має наступний вигляд:

1. Визначається перша вершина (ліва або права) за напрямком відношення, якщо воно некомутативне.

2. Обирається ліва/права вершина та інцидентне ребро.

3. Обирається права/ліва вершина з інцидентним ребром, яке має ліву/праву вершину.

4. Дводольний граф визначається як висловлювання.

5. Обчислюється значення висловлювання: істинність – вершини включаються до множини тавтологій, хибність – вершини не входять до цієї множини.

Візуалізація інформації у вигляді ієрархічного графу допомагає швидко знаходити потрібний елемент в ієрархії, розуміти зв'язок елемента з контекстом та забезпечувати можливість прямого доступу до інформації. Мережний граф може виступати не лише засобом організації інформації. Розширюючи його традиційні функції завдяки відображенню у вигляді просторово упорядкованої множини тавтологій, граф можна перетворити на середовище, в якому забезпечується активна робота з розподіленими інформаційними ресурсами на основі використання методів натуральних систем.

Задавши на множині концептів бінарне відношення часткової упорядкованості – $\tilde{p}$ [9, 10], отримаємо певну таксономію $\tilde{T}$, яка може бути представлена у вигляді орієнтовного бінарного дерева. Таким чином усі концепти та їх властивості можуть бути представлені у вигляді певних тверджень, над якими можливо виконати операції: об'єднання, перетин, логічне віднімання, декартовий добуток, вибірка, проекція, з'єднання, ділення. Більш того, завжди можна сформулювати певну множину відображень цих тверджень, яка буде володіти властивістю безперервності.

Одне з таких відображень задає перетворення ланцюгів з тверджень у вказані вище ланцюги бінарних дерев.

Згідно [5] існує відображення кожної онтології, яка визначає концепти, що утворюють деякі тавтології у вигляді бінарного дерева. Над такими деревами можливо задати такі ж самі операції, як і над твердженнями, а саме: об'єднання, перетин, віднімання, декартовий добуток, вибірка, проекція, з'єднання, ділення.

Також до переліку функцій і операцій F можливо включити операції, які задаються на множині концептів X . Тому у вигляді бінарного дерева може бути представлена і таксономія $\tilde{T}$, що відображає концепти, з яких формулюються умови задачі вибору. Така таксономія $\tilde{T}$ фактично відображає у вигляді бінарного дерева множину альтернатив, які визначають певні умови вибору найбільш оптимального інформаційного стану рішення.

На підставі зазначеного можна зробити висновок про те, що відношення бінарного дерева можуть бути задані над множиною таксономій на підставі визначеної аксіоми вибору виду (1), яка безпосередньо визначається аксіоматикою Цермело-Френкеля [11-13].

Тоді справедливим буде вираз:

$$\exists f: \tilde{T} \rightarrow F, \exists g: R \rightarrow F, \quad (2)$$

де f, g – відповідні відображення; F – множина операцій та функцій на таксономії $\tilde{T}$; R – множина відношень на таксономії $\tilde{T}$.

Відповідно, онтологію задачі вибору O_{TPCh} можна представити у вигляді бінарного дерева гомотопічного типу [13]:

$$O_{TPCh} \sqsubseteq T = (X, R, x^*), \quad (3)$$

де X – множина концептів певної онтології, які визначають вершини бінарного дерева; x^* – найменша за умовою вибору вершина бінарного дерева.

Вирази (1)–(3) визначають, що існує певне відображення між концептами онтології, їх бінарними деревами та відношеннями між концептами. Слід також враховувати, що усі відношення між концептами, що утворюють такі таксономії, можуть утворювати предикативні вирази, які визначають істинні твердження з вершин бінарного дерева, що утворені концептами онтології та зв'язані між собою відповідним відношенням часткової упорядкованості – $\tilde{p}$.

Онтологію вибору також можна представити у вигляді

$$O_{TPCh} = \langle \tilde{T}, (\tilde{p} \vee R^+), f(T) \rangle. \quad (4)$$

Тут $f(T)$ визначає цільову функцію знаходження мінімального вузла бінарного дерева T , а R^+ – множину властивостей бінарних вузлів як унарних відображень концептів таксономії $\tilde{T}$.

Отже, об'єктні та функціональні компоненти, що визначають онтологію задачі вибору, можуть утворювати функціональні онтології, концепти яких пов'язані певними бінарними відношеннями часткового порядку і можуть мати унарні властивості, що характеризують їх у певному якісному вигляді.

Досить ефективним методом представлення функціональних онтологій, для яких завжди існує зворотне перетворення у вигляд натуральної системи [14], є безтипове представлення у вигляді лямбда-виразів виду (4) [15, 16]:

$$f_a = (\lambda x. t(x))a = t(a), \quad (5)$$

де λ – теорія лямбда-числення; запис λx означає λ – терм; x – змінна, що приймає значення з множини концептів; t – вираз, який може містити змінну x ; a – аргумент функції, що визначає можливі значення змінної (можуть бути певні твердження); f_a – функція, яка застосовується до аргументу a .

Тоді кожне істинне твердження може бути представлено у вигляді послідовності лямбда-термів виду

$$[\lambda x_1 \dots x_n \dots x_l L_1 \dots L_m].$$

При цьому кожен додатковий терм цього виразу приписується на основі правила застосування множинного відношення бінарної часткової упорядкованості. Це дозволяє будувати ланцюжки тверджень на основі операції приписування праворуч нового терму, яким може бути як функція, так й аргумент.

З наведеного можна зробити ще один висновок: якщо концепти онтології володіють хоча б однією загальною властивістю або хоча би бінарним

відношенням часткового порядку, то з них можна побудувати розв'язуване твердження в термінах λ -числення.

Властивість зворотності виразу

$$\lambda x_1 \dots x_n \dots x_i L_1 \dots L_m$$

визначає можливість будувати розв'язувані твердження із заперечення існуючих термів на основі зміни множинного бінарного відношення часткової упорядкованості як на множині операцій над властивостями R , так і на множині таксономій $\tilde{T}$.

Тобто, справедливими для властивостей і для концептів є відображення виду [15]:

$$\lambda x_1 \dots x_n \dots x_i L_1 \dots L_m \xrightarrow{\tilde{P}} \lambda x_i \dots x_n \dots x_1 L_m \dots L_1 \quad (6)$$

і відповідно вираз, що пов'язує композиції відношень функцій і таксономій:

$$M \circ K = K \circ M = \lambda x.x, \quad (7)$$

де M і K – λ -терми, а кожен додатковий терм приписується на основі правила використання множинних відносин бінарної часткової упорядкованості.

Розгляд процесу взаємодії онтологій як функціонального відображення інформаційних ресурсів та узагальненої форми інтеграції через взаємодію натуральних систем може бути зведено до виділення лінійно-упорядкованої множини простору рішень задачі вибору, яке представимо у вигляді бінарного дерева та визначено над усіма загальними концептами взаємодіючих систем. Тоді онтологія задачі вибору визначає для кожної натуральної системи простір відображення її інформаційних станів, які можливо представити у вигляді певного OLAP-кубу (англ. Online analytical processing, аналітична обробка у реальному часі).

Згідно з положеннями теорії реляційної алгебри, будь-яке бінарне дерево з кінцевим числом вершин може бути представлено у вигляді об'єкта реляційної алгебри.

Відповідно, виходячи з положень теорії гомотопічних типів [17] та використовуючи поняття унівалентності [13], можна стверджувати про унівалентність онтології задачі вибору виду будь-якої операції реляційної алгебри:

$$O_{TPCh} \sqsubseteq R = f(R_1, R_2, \dots, R_n). \quad (8)$$

При цьому, кожна операція реляційної алгебри може бути представлена у вигляді

$$F = R \times R \rightarrow (X \times X) \times \dots \times (X \times X) \quad [17].$$

Для таких об'єктів онтологія задачі вибору унівалентна будь-якому об'єкту OLAP-кубу як засобу динамічного відображення взаємодій певних атрибутів інформаційної системи:

$$O_{TPCh} \sqsubseteq W : (X, Y, Z) \rightarrow W. \quad (9)$$

Опис OLAP-кубу виду

$$W : (X, Y, Z) \rightarrow W$$

може бути представлений у вигляді проєкції відношень згідно положень реляційної алгебри [17]. Між цими проєкціями існує бінарне відношення лінійної упорядкованості p , що дозволяє відношення p вивести з відношення $\tilde{p}$.

Якщо застосувати метод конверсії η для елементів, які отримано шляхом побудови проєкцій (X, Y, Z) і сформувати на їх основі вираз абстракції Λ [17], можна перейти до визначення певних бінарних структур, тобто сформувати онтологію задачі вибору. Наведена онтологія задачі вибору виду унівалентна будь-якому об'єкту векторного простору будь-якої розмірності:

$$O_{TPCh} \sqsubseteq V(F) = (V, F, +, \times), \quad (10)$$

де V – множина векторів; F – множина функціональних відображень V самого на себе; “+” та “ $\times$ ” – відповідно лінійні операції “додавання” та “множення”.

Зазначений векторний простір включає в себе відношення лінійної упорядкованості p , з якого можливо виділити бінарне відношення часткової упорядкованості. Тому з елементів, які безпосередньо складають векторний простір, можливо сформувати онтологію задачі вибору.

Представлення інформаційної системи у вигляді натуральної системи конструктивно забезпечує її реалізацію як онтологію. Отже, множини таксономій, що визначають взаємодію натуральних систем, можуть мати спільні вершини і непорожні перетини множин бінарних відношень унарних властивостей концептів таксономій. При цьому самі концепти можуть утворювати різні за тематиками класи. Це породжує проблему формування на основі всіх множин тематичних класів функцій-правил інтерпретації пов'язаних ланцюжків з тавтологією концептів, що складають термінополя взаємодіючих натуральних систем.

Отже задача, в процесі вирішення якої залучаються й використовуються різні за тематикою інформаційні ресурси, може бути представлена як складна композиція метазадач, в категорію яких входять процеси аналізу, виділення структури, визначення порядку, синтезу і вибору станів вирішення. Застосування бінарного відношення часткового порядку надає можливість задавати його не тільки над концептами взаємодіючих натуральних систем, а й над їх унарними властивостями. Тобто, при частковому впорядкуванні множини унарних властивостей концептів, що визначають простір станів рішення прикладної задачі, ці властивості можна представити у вигляді бінарних відношень. Це дозволяє включати множини таких властивостей в онтологію задачі вибору, яка визначається для кожної взаємодіючої системи.

Унівалентність задачі вибору згідно виразів (8)–(10) у будь-якому непорожньому реляційному

просторі дозволяє стверджувати, що контексти концептів, які у процесі розв'язання наведеної прикладної задачі можуть бути інтегровані для визначення множини тавтологій, описують кожен етап її вирішення.

Також слід відмітити конструктивність онтологій задачі вибору, що полягає в її унівалентності будь-якому гомотопічному типу.

Ця властивість дозволяє застосовувати до концептів тематичних онтологій широкий спектр операцій і правил.

Введення категорії упорядкованості до онтологій і натуральних систем будується на основі визначення категорії таксономії. При цьому під таксономією у контексті деяких онтологій, як натуральних систем NS , розуміється певна множина концептів онтології, які мають бінарну властивість упорядкованості.

Взаємодію як таку визначає множина задач, розв'язання яких забезпечує досягнення цілей. Множину станів вирішення задачі I представимо у вигляді:

$$I = \left\langle NS_0, NS_k, F \times R, X, R_t, \right. \\ \left. F, A, (X \times R_t \times R_s, R^+ \times R_t) \right\rangle, \quad (11)$$

де NS_0, NS_k – відповідно початковий та кінцевий стани натуральної системи; A – множина аксіом; R_s – множина обмежень $R_s = R^+ \times R$; R^+ – розглядається як замикавання відношень R_t ; R^+ – множина властивостей, які характеризують концепти підмножини таксономії $\tilde{T}'$, над якими задані бінарні відношення R_t .

Множина станів вирішення задачі I може включати до себе послідовність станів вирішення задачі онтологій вибору, яка унівалентна множині упорядкованих тавтологій:

$$\langle I \rangle \rightarrow \langle O_{TPCh} \rangle \quad \square \\ \square \neg(\forall x) \Pr(x) \leftrightarrow (\exists x) \neg \Pr(x), \quad (12)$$

де $\Pr(x)$ – предикатний вираз над значенням концепту “ x ” як певного твердження.

Згідно властивостей категорії таксономії [8] існують таксономії, за допомогою яких можливе утворення тавтологій, які включають усі концепти, що мають бінарну властивість упорядкованості.

Тоді певна таксономія може бути створена не пустою множиною відношень упорядкованості R_t , де $R_t \subset R | R_t \neq \emptyset$, а саме:

$$R_t = \\ = \left\{ t_i \in [t_1, t_n] \mid t_i = \prod_1^n x_k \times x_m \mid \begin{matrix} x \in X, k \neq m, \\ k \leq n, m \leq n \end{matrix} \right\}, \quad (13)$$

де k, n, m – натуральні числа.

При цьому множина

$$\prod_1^n x_k \times x_m$$

має властивість асоціативності [11, 12].

Тоді під таксономією у контексті застосування множин онтологій у процесі створення онтологічної системи, можна розглядати певну множину концептів онтології, які завжди мають бінарне некомутативне відношення та яке можливо інтерпретувати як властивість бути елементом певного класу. При цьому зі зазначених онтологій також можливе утворення упорядкованої множини, елементи якої мають бінарну некомутативну властивість бути елементом певної онтології.

У формалізованому вигляді це буде виглядати таким чином:

$$(\exists(x_i \times x_j = t_k) \mid \forall x_{1,n} \in X \rightarrow \exists t_{1,m} \in R_t) \Rightarrow \\ \Rightarrow (\exists O_1 \subset \prod_1^k O_i \mid O_i \times O_j = t_k). \quad (14)$$

Наведене твердження можна представити у наступній інтерпретації.

Множини тавтологій і тверджень створюють певні категорії [8]. Властивості концептів, на основі яких побудовані ці тавтології і твердження, також створюють категорію. Певну категорію мають і онтології, які створені цими концептами та їх властивостями.

Відповідно, між наведеними категоріями завжди існує морфізм [8] (рис. 1).

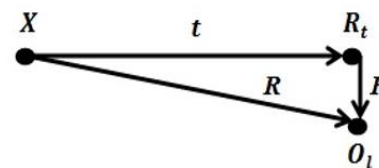


Рис. 1. Комутативна діаграма таксономії
(Fig. 1. Commutative diagram of taxonomy)

Комутативна діаграма, наведена на рис. 1, демонструє, що усі концепти створюють за своїми властивостями множину певних класів. Усі твердження, які можуть бути сформовані з концептів, що утворюють клас на основі певної означеної властивості, повинні бути тавтологіями. На їх основі створюється певна множина онтологій, усі елементи якої мають властивість – бути елементом певної онтології.

На основі тавтологій як представників класів, які створюються концептами операційного середовища (OpC), може бути створена система класифікації, яка, як і будь-яка система, повинна представляти певну ієрархію, кожен з елементів якої, у свою чергу, має внутрішню структуру (елементи внутрішньої структури та їх зв'язки) і взаємодіє із зовнішнім середовищем.

Якщо перекласти це мовою класифікацій, то внутрішня структура це:

- угруповання об'єктів класифікації;

- зв'язки внутрішньої структури (взаємне співвідношення угруповань об'єктів класифікації);
- взаємодія із зовнішнім середовищем (взаємозв'язки між класифікаційними угрупованнями різних концептів).

У взаємозв'язках є два аспекти угруповань:

- структурний – входження об'єктів класифікації до операційного середовища онтологічної системи на основі бінарних відношень та властивостей;

- лексико-семантичний – формування певних множин тверджень-висловлювань, які є тавтологіями відносно проблем, які вирішуються у операційному середовищі.

Практично задача створення системи класифікації інформаційних процесів у середовищі онтологічної системи зводиться до поєднання класифікацій на структурному та лексико-семантичному рівнях:

- по-перше, при взаємодії з однорідними класифікаціями найчастіше проста вихідна класифікація ОпС розширюється, а саме – додаються нові показники у вигляді тавтологій в існуючі розділи, підрозділи з присвоєнням нових кодів згідно системи кодування, прийнятої в операційному середовищі, а також додаються нові розділи, підрозділи у вигляді тавтологій;

- по-друге, при взаємодії з різномірними класифікаторами, які базуються на інших словниках, де показники мають інший сенс, що вимагає розгляду кожного окремого елементу класифікацій.

Тобто такі класифікатори можна розглядати як упорядковані множини тавтологій, на основі яких можуть бути створені таксономії операційного середовища ОпС.

Зазначену множину можна розглядати як послідовність упорядкованих тавтологій, які визначають множину можливих таксономій як функціональних компонентів операційного середовища.

Тобто довільне операційне середовище, яка описана певною множиною онтологій $\{O\}$ можливо представити у вигляді послідовності станів довільної натуральної системи SN , які мають вигляд послідовностей упорядкованих тавтологій, кожна з яких наслідуює усі властивості концептів, які створюють ці онтології.

Типове операційне середовище може бути створена певним набором тавтологій, які формуються на основі класів, що створені ієрархічною структурою концептів-об'єктів.

Тоді послідовність процесу вирішення задачі I може бути представлена певним бінарним деревом, яке утворюється відображенням множини таксономій та демонструє структуру взаємовідношень тавтологій.

Послідовність тавтологій, які утворюються таксономіями натуральної системи, й визначає процес взаємодії суб'єктів управління силами охорони правопорядку.

В свою чергу оцінити ефективність запропонованого методу (ЗМ) прийняття рішень для системи управління міжвідомчими критичними системами створеними при вирішенні надзвичайних ситуацій можна на основі порівняння часу, що витрачається на процес вирішення задачі $t(I)$ при збільшенні складності натуральних систем n існуючими графоаналітичними методами (ГАМ) (рис. 2).

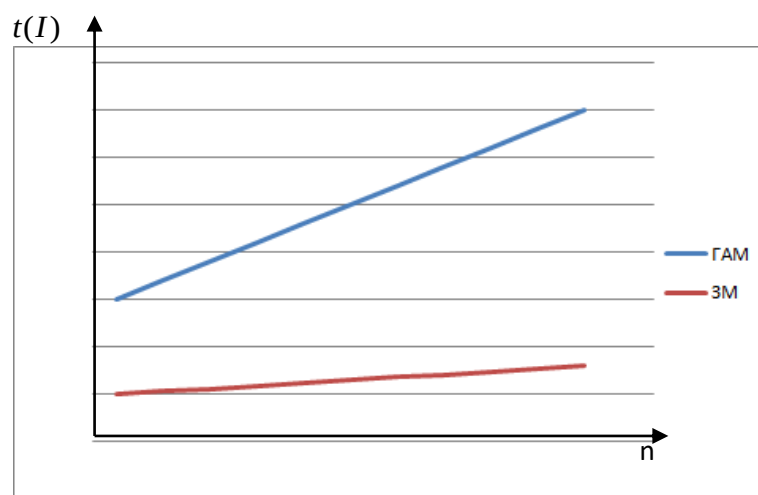


Рис. 2. Залежність значення показника ефективності від складності натуральних систем
(Fig. 2. Dependence of the value of the efficiency indicator on the complexity of natural systems)

Таким чином, ефективність інформаційного забезпечення процесів управління запропонованого методу над існуючими графоаналітичними методами показує його перевагу більшим у 2 рази.

Висновки

Аналіз і обробку великих масивів інформації у сфері управління військового командування в умовах надзвичайного стану доцільно здійснювати в автоматизованому режимі на основі розподіленого

програмного середовища, побудованого на принципах онтологій.

Онтологічні системи, як результат зворотного відображення натуральних систем, забезпечують коректне агрегування різних тематичних процесів за рахунок формування структурованої сукупності інформаційних об'єктів-концептів предметної області, які визначаються як єдиний тип даних. Технологія їх використання в мережному середовищі, в якому активуються процеси взаємодії складних інформаційних систем, дозволяє визначити над активно використовуваними інформаційними ресурсами відношення часткового порядку. Розгляд інформаційних ресурсів як тематичних систем знань дозволяє визначити їх семантичні характеристики на основі виділення інформаційних одиниць у вигляді концептів.

Онтологічне представлення контекстів зазначених одиниць-концептів забезпечує їх інтегроване використання в процесі вирішення складних задач органами управління військового

командування в умовах надзвичайного стану. Одним з конструктивних способів інтеграції інформаційних ресурсів як пасивних систем знань є активізація їх концептів на основі процесу формування з них тематичних онтологій і об'єднання цих онтологій шляхом побудови над ними онтології задачі вибору.

Унівалентність онтології задачі вибору будь-якому гомотопічному типу дозволяє будувати процедуру інтеграції інформаційних ресурсів на основі бінарного відношення часткового порядку.

Відношення часткового порядку інтегровано відобразити взаємодію контекстів понять-концептів, що визначають тематику інформаційних ресурсів.

За рахунок цього визначається онтологічний характер інтерпретації семантики контекстів об'єктів-концептів, які використовуються в процесі розв'язання задач в системі управління військового командування в умовах надзвичайного стану.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тютюнников Н. Н. Военная мысль в терминах и определениях: в 3 т. / Москва: Издательство «Перо», 2018. Т.3. Информатизация Вооруженных Сил / Сост. Н.Н. Тютюнников. 472 с.
2. Гринь В. Р. Вербальная модель инфосферы управления войсками (силами): ресурсный подход. Военная мысль. 2008. № 3. С. 62–69.
3. Лактионов В. И. Интеллектуальные технологии в информационно-аналитической деятельности органов военного управления: проблемы внедрения. Военная мысль. 2002. № 6. С. 60–64.
4. Бирюков В. В. Проблемы управления информатизацией ВС РФ. Военная мысль. 1999. № 4. С. 35–41.
5. Гладун В. П. Процессы формирования новых знаний. София: СД «Педагог 6», 1994. 192 с.
6. Gruber T. R. A translation approach to portable ontology specifications. Knowledge Acquisition, 1993. №. 5. P. 199–220.
7. Шаталкин А. И. Таксономия. Основания, принципы и правила. М.: Товарищ. научных изданий КМК, 2012. 600 с.
8. Колмогоров А. Н., Драгалин А. Г. Математическая логика. Москва: УРСС, 2005. 240 с.
9. Клини С. К. Введение в метаматерику. Москва: Иностранная литература, 1957. 526 с.
10. Микони С. Д. Теория и практика рационального выбора: Монография. Москва: Маршрут, 2014. 463 с.
11. Vladimir Voevodsky. An experimental library of formalized Mathematics based on the univalent foundations. Mathematical Structures in Computer Science. Cambridge University Press, 2015. Vol. 25. P. 1278–1294.
12. Малишевский А. В. Качественные модели в теории сложных систем. Москва: Наука. Физматлит, 1998. 528 с.
13. Барендрегт Х. Лямбда-исчисление. Его синтаксис и семантика: Пер. с англ. Москва: Мир, 1985. 606 с.
14. Лялецкий А. А. О некоторых свойствах теоретико-множественных моделей теории Лямбда. Математические машины и системы, 2008, №4. С. 10–22.
15. Технологии анализа данных. DataMining, VisualMining, TextMining, OLAP (2-е издание) / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, В. В. Степаненко, И. И. Холод. Санкт-Петербург.: БХВ-Петербург, 2007. 384 с.
16. Туманов В. Е. Основы проектирования реляционных баз данных. Москва: Интуит, 2016. 504 с.
17. Лямбда-исчисление. Его синтаксис и семантика / Х. Барендрегт. Пер. с англ. Москва: Мир, 1985. 606 с.

REFERENCES

1. Tyutyunnikov, N.N. (2018), "Informatization of the Armed Forces", *Military thought in terms and definitions*, Publishing house "Pero", Moscow, 472 p.
2. Grin, V.R. (2008), "Verbal model of the infosphere of command and control of troops (forces): a resource approach", *Voyennaya mysl*, No. 3, pp. 62–69.
3. Laktionov, V.I. (2002), "Intellectual technologies in the information and analytical activities of military command and control bodies: implementation problems", *Voyennaya mysl*, No. 66 pp. 60–64.
4. Biryukov, V.V. (1999), "Problems of Informatization Management of the RF Armed Forces", *Voyennaya mysl*, No. 4, pp. 35–41.
5. Gladun, V.P. (1994), *Processes of the formation of new knowledge*, SD "Pedagogue 6", Sofia, 192 p.
6. Gruber, T.R. (1993), "A translation approach to portable ontology specifications", *Knowledge Acquisition*, No. 5, pp. 199–220.
7. Shatalkin, A.I. (2012), *Taxonomy. Foundations, principles and rules*, KMK, Moscow, 600 p.
8. Kolmogorov, A.N. (2005), *Dragalin AG Mathematical logic*, URSS, Moscow, 240 p.
9. Kleene, S.K. (1957), *Introduction to metamathematics*, Foreign Literature, Moscow, 526 p.
10. Mikoni, S.D. (2014), *Theory and practice of rational choice*, Route, Moscow, 463 p.
11. Voevodsky, Vladimir (2015), "An experimental library of formalized Mathematics based on the univalent foundations", *Mathematical Structures in Computer Science*, Cambridge University Press, Vol. 25, pp. 1278–1294.
12. Malishevsky, A.V. (1998), *Qualitative models in the theory of complex systems*, Nauka, Fizmatlit, Moscow, 528 p.
13. Barendregt, X. (1985), *Lambda calculus. Its syntax and semantics*, Mir, Moscow, 606 p.

14. Lialetskiy, A.A. (2008), "On some properties of set-theoretic models of the Lambda theory", *Mathematical machines and systems*, No. 4, pp. 10–22.
15. Barsegyan, A.A., Kupriyanov, M.S., Stepanenko, V.V. and Kholod I.I. (2007), *Technologies for data analysis. DataMining, VisualMining, TextMining, OLAP*, BHV-Petersburg, Saint Petersburg, 384 p.
16. Tumanov, V.E. (2016), *Fundamentals of design of relational databases*, Intuit, Moscow, 504 p.
17. Barendregt, X. (1985), *Lambda calculus. Its syntax and semantics*, Mir, Moscow, 606 p.

Received (Надійшла) 16.11.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.01.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Іохов Олександр Юрійович – доктор технічних наук, доцент, начальник кафедри військового зв'язку та інформатизації, Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна;
Olexandr Iohov – 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: iohov@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1718-0138>.

Малюк Віктор Григорович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри військового зв'язку 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>.

Сальников Олександр Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри військового зв'язку та інформатизації, Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна;
Olexandr Salnikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Military Communication and Informatization, National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: ams2002@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4973-9634>.

Новикова Олена Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри військового зв'язку та інформатизації, Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна;
Olena Novykova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Military Communication and Informatization, National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: nangu.nea@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3557-5210>.

**Применение онтологии задачи выбора
 для описания процессов взаимодействия субъектов управления военной связью**

А. Ю. Іохов, В. Г. Малюк, А. М. Сальников, Е. А. Новикова

Аннотация. В статье доказано, что требует решения проблема наличия противоречия между увеличением объема информации, необходимым для принятия решений в сфере управления силами охраны правопорядка и постоянным требованием о сокращении времени на ее обработку в информационно-аналитической системе. **Цель статьи** заключается в повышении эффективности принятия решений в системе управления военного командования в условиях чрезвычайного положения путем применения онтологии задачи выбора на основе совокупности семантически значимых результатов. **Результаты исследования.** Проанализированы пути совершенствования механизмов информационно-аналитического обеспечения системы управления военного командования в условиях чрезвычайного положения. Использованный подход к применению онтологии задачи выбора для принятия решений в сфере управления силами охраны правопорядка с применением процедуры интеграции информационных ресурсов на основе бинарного отношения частичного порядка. Онтологические системы, как результат обратного отображения натуральных систем, обеспечивающих корректное агрегирование различных тематических процессов за счет формирования структурированной совокупности информационных объектов-концептов предметной области, которые определяются как единый тип данных. За счет этого определяется онтологический характер интерпретации семантики контекстов объектов-концептов, которые используются в процессе развязывания задач в системе управления военного командования в условиях чрезвычайного положения.

Ключевые слова: информационно-аналитическая система; онтология; таксономия; множество тавтологий; бинарное отношение частичного порядка.

**Application of the ontology of the choice of selection
 to describe the processes of interaction of subjects of military communication management**

Olexandr Iohov, Victor Maliuk, Olexandr Salnikov, Olena Novykova

Annotation. The ways of improving the mechanisms of information and analytical support of the command control system in the state of emergency are analyzed. The approach to the application of the ontology of the choice problem for decision-making in the field of law enforcement management using the procedure of integration of information resources based on the binary partial order relation is used. **The purpose of the article** is to increase the efficiency of decision-making in the management system of the military command in a state of emergency by applying the ontology of the choice problem based on a set of semantically significant results. **Results of the research.** Analysis and processing of large arrays of information in the field of military command management in a state of emergency should be carried out in an automated mode on the basis

of a distributed software environment based on the principles of ontologies. Ontological systems, as a result of the inverse mapping of natural systems, provide the correct aggregation of various thematic processes through the formation of a structured set of information objects-concepts of the subject area, which are defined as a single type of data. The ontological representation of the contexts of units-concepts provides their integrated use in the process of solving complex tasks by the governing bodies of the command in a state of emergency. One of the constructive ways to integrate information resources as passive knowledge systems is to activate their concepts based on the process of forming thematic ontologies and combining these ontologies by building an ontology of the choice problem over them. The uniqueness of the ontology of the choice problem to any homotopy type allows to build the procedure of integration of information resources on the basis of a binary partial order relation. The partial order relation allows to reflect in an integrated way interaction of contexts of the notion-concepts defining subjects of information resources. The contradiction between the increase in the amount of information needed for decision-making in the field of management of interdepartmental critical systems and the constant requirement to reduce the time for its processing in the information-analytical systems has been resolved.

Keywords: information-analytical system; ontology; taxonomy; many tautologies; partial order binary relation.

Lev Raskin, Oksana Sira, Yurii Parfeniuk

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute, Kharkiv, Ukraine

SELECTION OF THE OPTIMUM ROUTE IN AN EXTENDED TRANSPORTATION NETWORK UNDER UNCERTAINTY

Abstract. Relevance. For a given values set of extensive transport network sections lengths an exact method has been developed for finding optimal routes. The method provides an approximate solution when the initial data - are random variables with known distribution laws, as well as if these data are not clearly specified. For a special case with a normal distribution of the numerical characteristics of the network, solution is brought to the final results. Method. An exact method of deterministic routing is proposed, which gives an approximate solution in case of random initial data. The method is extended to the case when the initial data are described in theory of fuzzy sets terms. The problem of stability assessing of solutions to problems of control the theory under conditions of uncertainty of initial data is considered. Results. A method of optimal routes finding is proposed when the initial data are deterministic or random variables with known distribution densities. A particular case of a probabilistic - theoretical description of the initial data is considered when can be obtained a simple solution of problem. Proposed method for obtaining an approximate solution in the general case for arbitrary distribution densities of random initial data. The situation is common when the initial data are not clearly defined. A simple computational procedure proposed for obtaining a solution. A method for stability assessing of solutions to control problems adopted under conditions of uncertainty in the initial data, is considered.

Keywords: transport network; optimal route; initial data - random or fuzzy numbers; stability of solutions to control problems.

Introduction

The problem of optimal route finding represents an integral part of a more general, so-called, transport problem of linear programming [1].

Formulation of the problem. The problem statement is as follows: there are some given points of a certain product manufacturing $A_1, A_2, \dots, A_m$ and points of this product consumption $B_1, B_2, \dots, B_n$. For each manufacturing point A_i there it is given a_i volume of manufacturing, $i = 1, 2, \dots, m$ and for each point B_j of consumption b_j - the amount of consumption is also expected. So it is supposed to be known of product transportation routes from producers to consumers and there it must be set the appropriate matrix of values for the average cost of a product unit transportation $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$. It is required to find a matrix $X = (x_{ij})$ of values for planned transportation volumes that minimizes

$$L(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij}$$

and satisfies the next constraints:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = \overline{1, n},$$

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

Materials and methods. It is clear that the total average cost of transportation, which determines efficiency of plan X , depends upon a set of values (C_{ij}) , that are determined by routes connecting the points of manufacturing and consumption. The problem of forming a route for any pair of manufacturers -

consumer is one of the variants in general problem of the scheduling theory and for the particular case under consideration was mentioned in [2-4].

However, in the general case for distributed transport systems of high dimension, it was not considered. In this regard, the task of constructing optimal routes is urgent. The position of manufacturing points and product consumption is given. Each pair of these points is connected by a route made up of a set of sections specified by the points of their start and end.

Formally, it is natural to describe the problem model using a directed graph, the vertices of which correspond to route intermediate points, and to the arcs - the sections between these points. The length of each arc determines a quantitative measure efficiency of the corresponding section using in the desired route connecting manufacturing point and point of consumption.

The task is to find sequence of passage the selected sections set, total measure efficiency of which determines the best (in the chosen sense) route. If all the points are numbered, then it is convenient to specify each of the sections set with the numbers (i, j) points at beginning and at the end of this section. In this case, the triple of numbers (i, k, j) defines a pair of sequentially connected sections (i, k) and (k, j) . If the intermediate point k between points i, j is not the only possible one, then the problem of its best choice arises.

Supposed that as a measure of the usage efficiency in the route is selected by average value of a cargo unit transportation through this section and the predetermined values set of that measure in a matrix $C = C_{ij}$. This value C_{ij} is defined by following rule: the number gives a measure of section efficiency with a starting point i and endpoint j , $C_{ii} = 0$ and $C_{ij} = M$ (M - large number), if items i and j belong to different areas. Then the best intermediate point k^* between points i and j can be chosen using the relation

$$C_{ik}^* + C_{k,j}^* = \min_{k \in K} \{C_{ik} + C_{kj}\}, \quad (1)$$

where K – quantity of intermediate points between i and j .

Operation (1) introduced for two separated adjacent segments can be summarized as a sequence of portions of arbitrary length. For this purpose, we use the matrix commutation operation [5]. For two arbitrary matrices A and B of dimension $n \times n$, we introduce the matrix commutation operation $\otimes$ by the formula $C = A \otimes B$,

$$C_{ij} = \min_k (C_{ik} + C_{kj}), \quad i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}, k = \overline{1, n}. \quad (2)$$

For an arbitrary system of n points, we define matrix $C^{(1)} = (C_{ij}^{(1)})$ according to the rule formulated above. Then we calculate

$$C^{(2)} = C^{(1)} \otimes C^{(1)} \quad (3)$$

The elements of $C^{(2)}$ matrix, calculated by the formula (2) define length of the most effective in accordance with the selected measure for Two-step paths between all pairs of points (i, j) .

Let us look at a simple example. Let the route between point of manufacturing and consumption point pass through one of three intermediate points (Fig. 1).

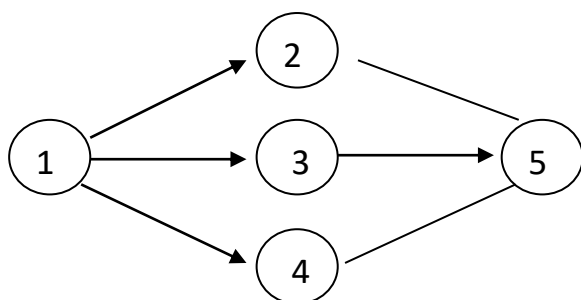


Fig. 1. Route system from point 1 to point 5

The values of average transportation cost for transport network segments, shown in Fig. 1, will be introduced into $C^{(1)}$ matrix:

$$C^{(1)} =$$

	1	2	3	4	5
1	0	4	3	5	M
2	M	0	M	M	6
3	M	M	0	M	8
4	M	M	M	0	7
5	M	M	M	M	0

Let us perform operation (3) taking into account (2). Wherein:

$$C_{11}^{(2)} = \min \left\{ \begin{array}{l} (C_{11}^{(1)} + C_{11}^{(1)}), (C_{12}^{(1)} + C_{21}^{(1)}), (C_{13}^{(1)} + C_{31}^{(1)}), \\ (C_{14}^{(1)} + C_{41}^{(1)}), (C_{15}^{(1)} + C_{51}^{(1)}) \end{array} \right\} =$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} (0+0), (4+M), (3+M), \\ (5+M), (M+M) \end{array} \right\} = 0;$$

$$C_{12}^{(2)} = \min \left\{ \begin{array}{l} (C_{11}^{(1)} + C_{12}^{(1)}), (C_{12}^{(1)} + C_{22}^{(1)}), (C_{13}^{(1)} + C_{32}^{(1)}), \\ (C_{14}^{(1)} + C_{42}^{(1)}), (C_{15}^{(1)} + C_{52}^{(1)}) \end{array} \right\} =$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} (0+4), (4+0), (3+M), \\ (5+M), (M+M) \end{array} \right\} = 4;$$

$$C_{13}^{(2)} = \min \left\{ \begin{array}{l} (C_{11}^{(1)} + C_{13}^{(1)}), (C_{12}^{(1)} + C_{23}^{(1)}), (C_{13}^{(1)} + C_{33}^{(1)}), \\ (C_{14}^{(1)} + C_{43}^{(1)}), (C_{15}^{(1)} + C_{53}^{(1)}) \end{array} \right\} =$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} (0+3), (4+M), (3+0), \\ (5+M), (M+M) \end{array} \right\} = 3;$$

$$C_{14}^{(2)} = \min \left\{ \begin{array}{l} (C_{11}^{(1)} + C_{14}^{(1)}), (C_{12}^{(1)} + C_{24}^{(1)}), (C_{13}^{(1)} + C_{34}^{(1)}), \\ (C_{14}^{(1)} + C_{44}^{(1)}), (C_{15}^{(1)} + C_{54}^{(1)}) \end{array} \right\} =$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} (0+5), (4+M), (3+M), \\ (5+0), (M+M) \end{array} \right\} = 5;$$

$$C_{15}^{(2)} = \min \left\{ \begin{array}{l} (C_{11}^{(1)} + C_{15}^{(1)}), (C_{12}^{(1)} + C_{25}^{(1)}), (C_{13}^{(1)} + C_{35}^{(1)}), \\ (C_{14}^{(1)} + C_{45}^{(1)}), (C_{15}^{(1)} + C_{55}^{(1)}) \end{array} \right\} =$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} (0+M), (4+6), (3+8), \\ (5+7), (M+0) \end{array} \right\} = 10;$$

$$C_{21}^{(2)} = C_{23}^{(2)} = C_{24}^{(2)} = M, \quad C_{25}^{(2)} = 6;$$

$$C_{31}^{(2)} = C_{32}^{(2)} = C_{34}^{(2)} = M, \quad C_{35}^{(2)} = 8;$$

$$C_{41}^{(2)} = C_{42}^{(2)} = C_{43}^{(2)} = M, \quad C_{45}^{(2)} = 7;$$

Let us summarize the results obtained in a matrix $C^{(2)}$:

$$C^{(2)} =$$

	1	2	3	4	5
1	0	4	3	5	10
2	M	0	0	M	6
3	M	M	0	M	8
4	M	M	M	0	7
5	M	M	M	M	0

Thus, the optimal route from point 1 to the point 5 passes through an intermediate point 2 and has a measure of effectiveness - 10.

The introduced commutation operation can be used to find optimal route of arbitrary length by recurrent calculating in sequence of matrices:

$$C^{(3)} = C^{(2)} \otimes C^{(1)}, \quad C^{(k+1)} = C^{(k)} \otimes C^{(1)}. \quad (4)$$

The formulated problem of optimal route finding becomes much more complicated if the initial data has uncertainty. The solution of problem under these conditions is important for theoretical and practical interest.

The aim of work is to construct a computational procedure for solving the problem of finding optimal

routes under conditions when the initial data have random variables with known distribution laws. In accordance to this, we will assume that the cost of transportation for each section C_{ij} is a random variable with a known distribution density $\phi_{ij}(C_{ij})$.

Main results

Let us give some simplest example of possible solving problem technology for finding optimal route for a transport network, shown in Fig. 1. In this task let us assume to be known the densities of distribution $\phi_{ij}(C_{ij})$, $i = 1, 2, 3, 4$; $j = 2, 3, 4, 5$. Then with basics on well-known rules of probability theory, we find the density distribution $\phi_{1k5}(C_{1k5})$, $C_{1k5} = C_{1k} + C_{k5}$, $k = 2, 3, 4$. As the optimal criterion of route using some probability that is a random value of passing on this route exceeds the threshold, the allowable value, we will calculate

$$P[(C_{1k5} = C_{1k} + C_{k5}) > C_{\Pi}] = \int_{C_{\Pi}}^{\infty} \phi_{1k5}(C_{1k5}) dC_{1k5}, \quad K = 2, 3, 4. \quad (5)$$

The best route will be that one for which probability of exceeding the threshold will be the least.

This technology can be difficult to implement even in this simplest particular case by the need to find an analytical expression for the density $\phi_{ij}(C_{ij})$ by taking integral

$$\phi_{ikj}(C_{ikj}) = \int_0^{\infty} \phi_{ik}(C_{ik}) \cdot \phi_{kj}(C_{ikj} - C_{ik}) dC_{ik}$$

with subsequent use in (5). In this case, analytical expression for the compositional distribution density $\phi_{ikj}(C_{ikj})$ will be more complicated than expressions for the composition elements $\phi_{ik}(C_{ik})$ and $\phi_{kj}(C_{kj})$. This means that the recurrent solution of a more general problem in accordance with technology (4) at each subsequent step will be more difficult than at previous one.

Note, however, that in some special cases a simple solution to the problem is possible if, for example, the random variables are distributed according to normal distribution law. Suppose that in the example considered above, random values of transportation costs are distributed normally and the corresponding densities have the form:

$$\begin{aligned} \phi_{12}(C_{12}) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 2} \exp\left\{-\frac{(C_{12}-4)^2}{8}\right\}, \\ \phi_{13}(C_{13}) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 3} \exp\left\{-\frac{(C_{13}-3)^2}{18}\right\}, \\ \phi_{14}(C_{14}) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 9} \exp\left\{-\frac{(C_{14}-5)^2}{2}\right\}, \\ \phi_{25}(C_{25}) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 3} \exp\left\{-\frac{(C_{25}-6)^2}{18}\right\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_{35}(C_{35}) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 4} \exp\left\{-\frac{(C_{35}-8)^2}{32}\right\}, \\ \phi_{45}(C_{45}) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(C_{45}-7)^2}{2}\right\}. \end{aligned}$$

Let define expression for density distribution of composite random variables C_{ijk} .

$$\begin{aligned} \phi_{125}(C_{125}) &= \phi_{125}(C_{12} + C_{25}) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}(4+9)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{[C_{125}-(4+6)]^2}{2(4+9)}\right\} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 3.6} \exp\left\{-\frac{(C_{125}-10)^2}{26}\right\}; \\ \phi_{135}(C_{135}) &= \phi(C_{13} + C_{35}) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}(9+16)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{[C_{135}-(3+8)]^2}{2(9+16)}\right\} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 5} \exp\left\{-\frac{(C_{135}-11)^2}{50}\right\}; \\ \phi_{145}(C_{145}) &= \phi_{145}(C_{14} + C_{45}) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}(1+1)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{[C_{145}-(5+7)]^2}{2(1+1)}\right\} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(C_{145}-12)^2}{4}\right\}. \end{aligned}$$

Let us now calculate values of optimality criterion for routes using (5). Let us choose the threshold value for cost of transportation equal to maximum of the average values of composite costs with a certain weight coefficient α . Then

$$C_{kp} = \alpha \cdot \max(10; 11; 12) = \alpha \cdot 12 \underset{\alpha=1.15}{=} 13.8;$$

$$\begin{aligned} P(C_{ikj} > C_{\Pi}) &= \int_{C_{\Pi}}^{\infty} \phi_{ikj}(C_{ikj}) dC_{ikj} = \\ &= \int_{C_{\Pi}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ikj}} e^{-\frac{(C_{ikj}-\bar{C}_{ikj})^2}{2\sigma_{ikj}^2}} dC_{ikj} \underset{(C_{ikj}-\bar{C}_{ikj})/\sigma_{ikj}=u}{=} \\ &= \int_{(C_{\Pi}-\bar{C}_{ikj})/\sigma_{ikj}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} du = \int_{a_{ikj}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} du. \end{aligned} \quad (6)$$

The best route corresponds to minimum value of probability of exceeding the critical value, that is, maximum of lower limit values a_{ikj} in integral (6) for different routes. Thus, the value $a_{ikj}^* = \max_k \{a_{ikj}\}$ becomes a criterion for route choosing. Let us calculate a_{ikj} value:

$$a_{125} = \frac{C_{\Pi} - \bar{C}_{125}}{\sigma_{125}} = \frac{13.8 - 10}{13^{0.5}} = \frac{3.8}{3.61} = 1.052,$$

$$a_{135} = \frac{C_{II} - \bar{C}_{135}}{\sigma_{135}} = \frac{13.8 - 11}{5} = \frac{2.8}{5} = 0.56,$$

$$a_{145} = \frac{C_{II} - \bar{C}_{145}}{\sigma_{145}} = \frac{13.8 - 12}{2^{0.5}} = \frac{1.8}{1.41} = 1.277,$$

$$a_{15}^* = \max_k \{1.052; 0.56; 1.277\} = a_{145}.$$

Thus, the route through intermediate point 4, which has worst value of average transportation cost, turned out to be the best due to minimum level of uncertainty in estimating transportation cost.

It is clear that in the particular case considered, the execution of procedure (2) - (3) for choosing best route does not cause any difficulties. An approximate (empirical) solution to problem in the general case can be obtained if in some natural way the method for calculating criterion for choosing a route a_{ikj}^* is simplified.

The value of this criterion is maximum if the values of transportation average cost and variance of this value are minimal. In this regard, let us choose $\eta_{ikj} = C_{ikj} \cdot \sigma_{ikj}$ value. The best route (ikj) corresponds to minimum value η_{ikj} . In the considered example, we have

$$\eta_{125} = C_{125} \cdot \sigma_{125} = 10 \cdot 3.61 = 36.1;$$

$$\eta_{135} = C_{135} \cdot \sigma_{135} = 11 \cdot 5 = 55;$$

$$\eta_{145} = C_{145} \cdot \sigma_{145} = 12 \cdot 1.41 = 16.2.$$

Thus, the route (1-4-5) is the best again. The possibility of practical use of this criterion is determined by the simplicity of calculating the mean values and variances of random variables for any density of their distribution. Finally, note that introduction of a new criterion η expands the possibilities of using proposed technology for optimal route choosing, to the case when uncertainty of initial data is described in terms of the fuzzy sets theory [5-8]. Indeed, let the membership function $\mu(C)$ be used to describe the fuzzy value of transportation cost C . Let us introduce the function [9]

$$f(c) = \mu(C) / \int_0^\infty \mu(C) dC.$$

This function has all the properties distribution density of random variable: it is not negative and

$$\int_0^\infty f(C) dC = 1.$$

This function now calculates the expected value in usual way (mathematical expectation analogue) and variation (analogue of the standard deviation) which is used to calculate η criterion, after which described technology of finding optimal route is implemented.

Let us consider another important problem that usually arises when solving control problems. The modern theory of management traditionally assumes that there is an uncertainty in the description of control system u environment in which the system operates.

Taking this uncertainty into account is necessary when solving the problem of optimal control itself and

when assessing its quality. In this case, question of how initial uncertainty affects on solution correctness of control problem and on possibility of retaining this solution in the presence of uncertainty, i.e. on solution stability.

Various definitions of stochastic stability concept are well-known. A solution is called stable by probability if it is possible to find such a level of initial uncertainty at which the probability of deviation from decision does not exceed the given one [10]. A solution is called stable in terms mathematical expectation of a norm if it is possible to find such a level of perturbation at which the probability of deviations of the norm from the adopted decision does not exceed a given value [11]. In accordance with this, property of control system to develop correct solution and keep it in a certain range of random distortions of input information is called the stochastic stability of the system [12].

The problem of assessing stochastic stability has principal importance when solving optimal control problems under conditions of uncertainty in initial data. The criteria and method for solving this problem essentially depends on whether the set of solutions Q is continuous or discrete. In cases where this set is continuous, then the following criteria is usually used to assess stochastic stability [13 – 15]:

- a) probability that the deviation from norm of objective function from its optimal value does not exceed the given one;
- b) distortion degree of optimal solution;
- c) deviation variance of objective function numerical value from the optimal value obtained in absence of uncertainty.

If the set of solutions is discrete, then natural criterion for assessing stability is probability of optimal solution distortion in the presence of uncertainty. Considering a method for solving the problem in this case, let us introduce the necessary notation.

Let a discrete set Q consist of n elements, that is $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$. Let Ω be a multidimensional continuous factorial space, each point of which corresponds to a vector w .

The numerical values of vector component is determined and the state of environment in system at a given time.

The decision-making algorithm is a certain operator A that maps points in the space Ω to the elements of decisions Q set. Thus, a specific vector of environment states and system w_i corresponds to the decision q_i determined by rule:

$$q_i = A(w_i), \quad w_i \in \Omega, \quad q_i \in Q, \quad Q, i = 1, 2, \dots, n.$$

In accordance with this, space Ω is divided into n domains $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n$ so

$$\Omega_i = \{w: w \in \Omega, A(w) = q_i\} \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

$$\cup \Omega_i = \Omega, \quad \cap \Omega_i = \emptyset.$$

Let q_{i_0} be the optimal solution corresponding to current situation. Then probability of this optimal

decision will be made in presence of initial information uncertainty P_{i_0} is equal to

hitting in vector w probability, determining state of the environment and system, in this situation, into range Ωq_{i_0} .

In this case, if $f(w)$ - multidimensional distribution density of w vector, then

$$Pq_{i_0} = \int_{\Omega q_{i_0}} f(w) dw.$$

It follows that problem of assessing stability is reduced to solving the following two problems: finding an analytical description of range Ω_i boundaries and probability calculating of vector w hit probabilities inside each of the ranges.

The first of these problems solution in the general case is hardly feasible, but in specific special cases it can be obtained.

Consider, for example, the simplest problem of optimal route choosing out of two possible ones. In this case, possible solutions set Q contains two elements: q_1 – first route is selected, q_2 – second route is selected. Let us set a one-coordinate phase space whose points represent to cost of transporting a unit of cargo from a supplier to a consumer. Let the random values of transportation costs for first and second routes be evenly distributed:

$$f_1(C_1) = \begin{cases} \frac{1}{2a_1}, & C_1 \in [C_1^{(0)} - a_1, C_1^{(0)} + a_1] \\ 0, & C_1 \notin [C_1^{(0)} - a_1, C_1^{(0)} + a_1] \end{cases} \quad (7)$$

$$f_2(C_2) = \begin{cases} \frac{1}{2a_2}, & C_2 \in [C_2^{(0)} - a_2, C_2^{(0)} + a_2] \\ 0, & C_2 \notin [C_2^{(0)} - a_2, C_2^{(0)} + a_2] \end{cases} \quad (8)$$

Suppose that $C_1^{(0)} < C_2^{(0)}$ and therefore first route is chosen as optimal one. Let us estimate the stability of this solution.

Possible options for graphical display of the task are shown in Fig. 2. The shaded areas in Fig. 2 contain sets of points (C_1, C_2) , for which $C_1 < C_2$. Probabilities of getting into these areas determine the consideration degree of choice q_1 . These probabilities are calculated by the formula

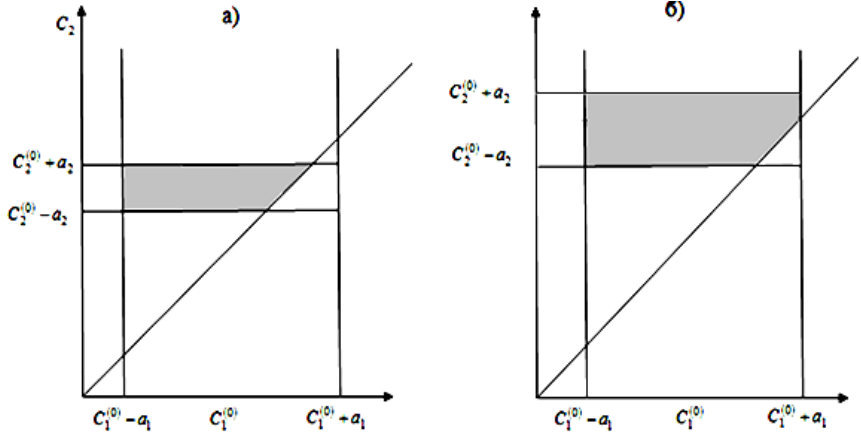


Fig. 2. Graphical displays of the route selection problem

$$\begin{aligned} P(C_1 < C_2) &= \int_{C_1^{(0)}-a_1}^{C_2^{(0)}-a_2} \frac{1}{2a_1} dC_1 + \\ &+ \int_{C_2^{(0)}-a_2}^{\min(C_2^{(0)}+a_2, C_1^{(0)}+a_1)} \frac{1}{2a_1} dC_1 \int_{C_1}^{C_2^{(0)}+a_2} \frac{1}{2a_2} dC_2 = \\ &= \frac{1}{2a_1} (C_2^{(0)} - a_2 - C_1^{(0)} + a_1) + \\ &+ \int_{C_2^{(0)}-a_2}^{\min(C_2^{(0)}+a_2, C_1^{(0)}+a_1)} \frac{1}{4a_1a_2} (C_2^{(0)} + a_2 - C_1) dC_1 = \quad (9) \\ &= \frac{1}{2a_1} (C_2^{(0)} - a_2 - C_1^{(0)} + a_1) + \left[\frac{1}{4a_1a_2} (C_2^{(0)} + a_2) \times \right. \\ &\times \left[\left(\min(C_2^{(0)} + a_2, C_1^{(0)} + a_1) \right) - (C_2^{(0)} - a_2) \right] - \\ &\left. - \frac{1}{2} \left[\left(\min(C_2^{(0)} + a_2, C_1^{(0)} + a_1) \right)^2 - (C_2^{(0)} - a_2)^2 \right] \right]. \end{aligned}$$

The analysis of the obtained expression shows that its maximum value equal to 1 (corresponds to the absolute solution stability) is achieved when (Fig. 3, a):

$$C_2^{(0)} - a_2 = C_1^{(0)} + a_1, \text{ that is } C_2^{(0)} - C_1^{(0)} = a_1 + a_2.$$

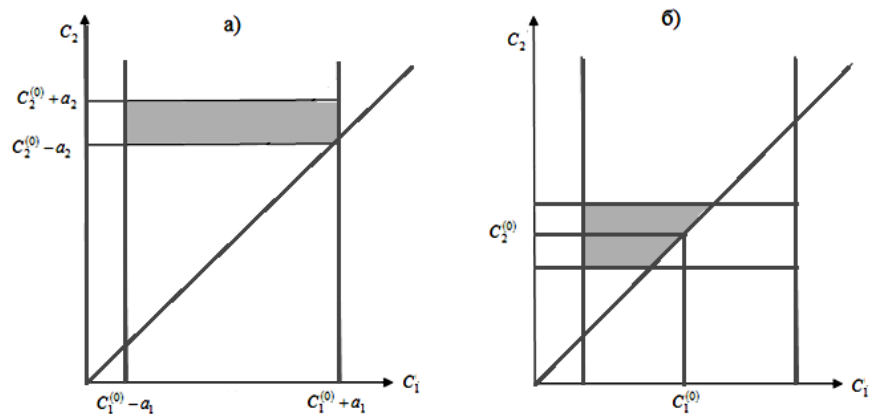


Fig. 3. Graphical display of options for route selection tasks

Wherein $P(C_1 \leq C_2) = P(C_1 > C_2)$.

The proposed method for solutions stability calculating of control problems, adopted under conditions of uncertainty in initial data, can be used when choosing for optimal option from a discrete set of possible ones. Let us determine, for example, stability of made decision in problem of optimal route choosing considered above. Let us simplify it as much as possible by reducing it to a two-alternative one. Let there are two competing routes for which random cost of transportation distribution densities are given (7), (8) with specific values

$$C_1^{(0)} = 11, a_1 = 5; C_2^{(0)} = 12, a_2 = 2.$$

Let the first route be chosen as optimal one. Let us determine solution stability. Specifying the general relation (9) for this case, we have

$$\begin{aligned} P(C_1 < C_2) &= \int_{C_2^{(0)}-a_2}^{C_2^{(0)}+a_2} \frac{1}{2a_1} dC_2 \int_{C_1^{(0)}-a_1}^{C_2} \frac{1}{2a_1} dC_1 = \\ &= \frac{1}{4a_1a_2} \int_{C_2^{(0)}-a_2}^{C_2^{(0)}+a_2} (C_2 - C_1^{(0)} + a_1) dC_2 = \\ &= \left(2a_2C_2^{(0)} - (C_1^{(0)} - a_1)2a_2 \right) / (4a_1a_2) = \\ &= (C_2^{(0)} - C_1^{(0)} + a_1) / 2a_1 = 1/2 + (C_2^{(0)} - C_1^{(0)}) / 2a_1. \end{aligned} \quad (10)$$

Wherein $P(C_1 < C_2) = 1/2 + 1/10 = 0.6$.

The obtained value of stability in this particular case is not large, due to small difference between $C_1^{(0)}$ and $C_2^{(0)}$ and large value of a_1 parameter. The proposed method for assessing solution stability of the problem can be generalized in case when the cost requirement for the selected route is formed more stringently, particularly: $kC_1 < C_2, k > 1$. In this case, the calculation formula (10) for assessing stability will take the form:

$$\begin{aligned} P(kC_1 < C_2) &= \int_{C_2^{(0)}-a_2}^{C_2^{(0)}+a_2} \frac{1}{2a_2} dC_2 \int_{C_1^{(0)}-a_1}^{C_2/k} \frac{1}{2a_1} dC_1 = \\ &= \frac{1}{4a_1a_2} \int_{C_2^{(0)}-a_2}^{C_2^{(0)}+a_2} \left(\frac{C_2}{k} - C_1^{(0)} + a_1 \right) dC_2 = \\ &= \left(2a_2C_2^{(0)}/k - (C_1^{(0)} - a_1)2a_2 \right) / (4a_1a_2) = \\ &= \frac{C_2^{(0)}/k - C_1^{(0)} + a_1}{2a_1} = \frac{1}{2} + \frac{C_2^{(0)}/k - C_1^{(0)}}{2a_1}. \end{aligned}$$

Moreover, for the same initial data ($C_1^{(0)} = 11, C_2^{(0)} = 12, a_1 = 5$) and $k = 1.09$ the value of stability level, the solution will be equal to $P(kC_1 < C_2) = \frac{1}{2} + \frac{12/1.09 - 11}{10} \approx \frac{1}{2}$ that is, the choice of first route is unstable.

Directions for further research may be related to consideration of problems in cases where similar ones are inaccurate in the sense of Pavlak [16-19].

A possible approach to solving the problems arising in this case was proposed in [20, 21].

Conclusions

Proposed method for finding optimal routes when the initial data are deterministic or random variables with known distribution densities.

A particular case of a probabilistic-theoretical description of the initial data is considered, when a simple solution to the problem can be obtained.

The given method provides an approximate solution in the general case for arbitrary distribution densities of random initial data.

Considered situation when initial data are not clearly defined. A simple computational procedure for obtaining a solution is gained.

A method for assessing the solutions stability to control problems adopted under conditions of uncertainty in initial data is considered.

REFERENCES

1. Yudin, D.B. and Golshtein, E.G. (1969), *Issue of linear programming transport type*, Nauka, Moscow, 384 p.
2. Sira, O.V. (2010), *Multidimensional models of logistics in conditions of uncertainty*, FOP Stetsenko I.I., Kharkiv, 512 p.
3. Raskin, L.G. and Kirichenko I.O. (1982), "Multi-index problems of linear programming", *Radio and communication*, Moscow, 240 p.
4. Raskin, L.G. (1976), *Analysis of complex systems and control theory elements*, Sov. radio, Moscow, 344 p.
5. Raskin, L.G. and Sira O.V. (2008), *Fuzzy mathematics*, Parus, Kharkiv, 352 p.
6. Zadeh, L.A. (1965), "Fuzzy sets", *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338-353.
7. Dubois, D. and Prade, A. (1990), "Theory of possibilities. Application to the representation of knowledge in computer science", *Radio and communication*, Moscow, .286 p.
8. Kofman, A. (1982), "Introduction to the theory of fuzzy sets", *Radio and communication*, Moscow, 486 p.
9. Liu, B. and Zhao, R. (1995), *Stochastic Programming and Fuzzy Programming*, Tsinghua University Press, 312 p.
10. Raskin, L.G. (1988), *Mathematical methods for the study of operations and analysis of complex air defense weapons systems*, VIRT, Kharkiv, 177 p.
11. Kachanov, N.A. (2000), *Optimal control of the state of dynamic systems under uncertainty*, Techno-Art, Kharkiv, 209 p.
12. Kushner, G.J. (1969), *Stochastic stability and control*, Mir, Moscow, 201p.
13. Zubarev, V.V., Kovtunencko, A.P. and Raskin, L.G. (2005), *Mathematical methods for assessing and predicting technical indicators of the operational properties of radio engineering systems*, NAU, Kyiv, 184 p.
14. Bodyansky, E.V. and Boryachok, M.D. (1993), *Optimal control of stochastic objects under uncertainty*, ISDO, Kyiv, 162 p.
15. Letov A.M. (1981), *Mathematical theory of control process*, Nauka, Moscow, 256 p.

16. Pawlak, Z. (1982), *Rough sets: International Journal of Information and Computer Sciences*, Vol.11, No.5, pp. 341–356.
17. Pawlak, Z. (1991), *Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 284 p.
18. Slowinski, R. and Vanderpooten, D. (2000), "A generalized definition of rough approximations based on similarity", *IEEE Transactions on Knowledge and data Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 331–336, DOI: <https://doi.org/10.1109/69.842271>.
19. Alefeld, G. and Herzberger, J. (1983), *Introduction to Interval Computations*, Academic Press, New York, 352 p.
20. Raskin, Lev and Sira Oksana (2016), "Fuzzy models of rough mathematics", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, Issue 4, pp. 53-60, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.86739>.

Received (Надійшла) 18.11.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 03.02.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Раскин Лев Григорович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Lev Raskin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Distributed Information Systems and Cloud Technologies Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: topologyr@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9015-4016>.

Сіра Оксана Володимирівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Oksana Sira – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Distributed Information Systems and Cloud Technologies Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: topologys@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4869-2371>.

Парфенюк Юрій Леонідович – аспірант кафедри розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Yurii Parfeniuk – Postgraduate Student of Distributed Information Systems and Cloud Technologies Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: parfuriy.l@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5357-1868>.

Вибір оптимального маршруту у розподіленій транспортній мережі в умовах невизначеності

Л. Г. Раскин, О. В. Сіра, Ю. Л. Парфенюк

Анотація. Актуальність. Для заданого набору значень довжин ділянок розгалуженої транспортної мережі розроблений точний метод відшукування оптимальних маршрутів. Метод забезпечує отримання наближеного рішення, коли вихідні дані - випадкові величини з відомими законами розподілу, а також, якщо ці дані задані нечітко. Для окремого випадку з нормальним розподілом числових характеристик мережі рішення доведено до кінцевих результатів. **Метод.** Запропоновано точний метод детермінованої маршрутизації, що дає наближене рішення, якщо вихідні дані випадкові. Метод поширений на випадок, коли вихідні дані описані в термінах теорії нечітких множин. Розглянуто проблему оцінки стійкості рішень задач теорії управління в умовах невизначеності вихідних даних. **Результати.** Запропоновано метод відшукування оптимальних маршрутів, коли вихідні дані - детерміновані або випадкові величини з відомими щільностями розподілу. Розглянуто окремий випадок теоретико-імовірнісного опису вихідних даних, коли може бути отримано просте рішення задачі. Запропоновано метод отримання наближеного рішення в загальному випадку для довільних щільностей розподілу випадкових вихідних даних. Розглянуто ситуацію, коли вихідні дані визначені нечітко. Запропоновано проста обчислювальна процедура отримання рішення. Розглянуто метод оцінки стійкості рішень задач управління, прийнятих в умовах невизначеності вихідних даних.

Ключові слова: транспортна мережа; оптимальний маршрут; похідні дані – випадкові або нечіткі числа; стійкість рішень задач управління.

Выбор оптимального маршрута в разветвленной транспортной сети в условиях неопределенности

Л. Г. Раскин, О. В. Сера, Ю. Л. Парфенюк

Аннотация. Актуальность. Для заданного набора значений длин участков разветвленной транспортной сети разработан точный метод отыскания оптимальных маршрутов. Метод обеспечивает получение приближенного решения, когда исходные данные – случайные величины с известными законами распределения, а также, если эти данные заданы нечетко. Для частного случая с нормальным распределением числовых характеристик сети решение доведено до конечных результатов. **Метод.** Предложен точный метод детерминированной маршрутизации, дающий приближенное решение, если исходные данные случайны. Метод распространен на случай, когда исходные данные описаны в терминах теории нечетких множеств. Рассмотрена проблема оценки устойчивости решений задач теории управления в условиях неопределенности исходных данных. **Результаты.** Предложен метод отыскания оптимальных маршрутов, когда исходные данные – детерминированные или случайные величины с известными плотностями распределения. Рассмотрен частный случай теоретико-вероятностного описания исходных данных, когда может быть получено простое решение задачи. Предложен метод получения приближенного решения в общем случае для произвольных плотностей распределения случайных исходных данных. Рассмотрена ситуация, когда исходные данные определены нечетко. Предложена простая вычислительная процедура получения решения. Рассмотрен метод оценки устойчивости решений задач управления, принятых в условиях неопределенности исходных данных.

Ключевые слова: транспортная сеть; оптимальный маршрут; исходные данные – случайные или нечеткие числа; устойчивость решений задач управления.

Information systems research

UDC 621.396

doi: 10.20998/2522-9052.2021.1.09

Olesia Barkovska, Vladyslav Kholiev, Daria Pyvovarova, Heorhii Ivashchenko, Dmytro Rosinskiy

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

INTERNATIONAL SYSTEM OF KNOWLEDGE EXCHANGE FOR YOUNG SCIENTISTS

Abstract. The paper proposes a system which is electronic data storage (of qualification works of students from different countries) and provides the capability to identify and connect young scientists conducting research on a related problem area. The purpose of developing this system is to provide opportunities for knowledge exchange, research in a team on a common problem, as well as to identify scientific trends in different countries. In this paper, the preprocessing **methods** influence on the work of classifiers such as Logistic Regression, LSTM, BERT, LightGBM was researched. A study was conducted on the speed of classification and F1 assessment. **Conclusions.** Lemmatization showed to require a shorter operating time compared to stemming by almost twice and a better score by an average of 5 percent, so it was decided to use the Logistic Regression classifier with lemmatization at the stage of text preparation in the subsequent operation of the proposed ISKE.

Keywords: system; NLP; text, processing; acceleration; shingles; proximity; likeness; classification; preprocessing; lemmatization; stemming.

Introduction

It is known that the accumulation of information has been going on since ancient times. From the first years of its existence, mankind has used such a natural information technology as language.

Later, along with language, people began to use imagery and writing to store and transmit information. With the development of language and general culture of peoples, different types of writing began to appear as

a co called "hard copy". The main purpose of writing is storing information. Thus, the main task of writing is to record information on media and transmit it to other people. The phenomenon of the global information revolution of the late XX century led to the introduction of information technology using computers, data servers, computer servers, various types of digital media for information storage. Stages of information technology development depending on the types of tools are shown in Fig. 1.

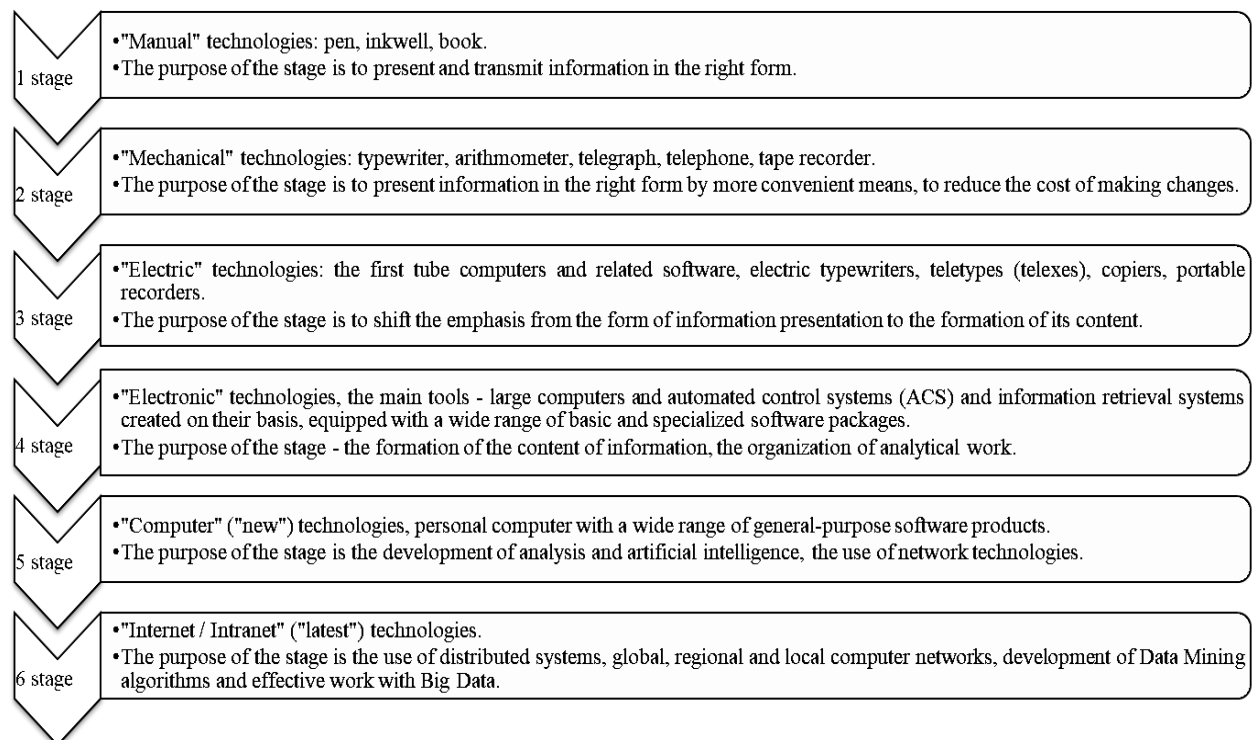


Fig. 1. Stages of information technology development

The importance of storing and accumulating information in a structured form is also evidenced by the fact that for the first time in library practice to

classify hundreds of thousands of books by field of knowledge and compile catalogs with the author and the name of each book began as early as in the Library of

Alexandria. Today, the development of the information society has changed the library world in the direction of remote access to libraries through the creation of electronic catalogs. The main type of storage media is electronic media, which has advantages such as small size, large storage capacity, easy mobility and access to the library collection from different corners of the world. Additional features include the relative ease of structuring information as well as searching [1-4].

The problem is the continuous increase in the amount of information, which leads to such requirements as increasing the speed of search engines and systems for categorizing information.

Among the types of libraries that can be distinguished (as shown in Fig. 2) there are thematic libraries (juridical, medical, military, musical, transport, art libraries, philosophical) and specialized-corporate, i.e. those that are relevant and in demand by a group of readers with a certain status, for example – student, PhD student, researcher, young scientist. In the XXI century, a prominent feature of library development is the work of international library associations in the direction of:

- Integration;
- Development of electronic library science;
- The establishment and strengthening of international ties between libraries;
- Conducting research in the field of library science and bibliography.

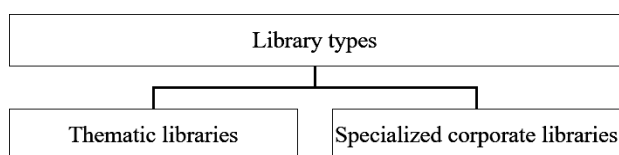


Fig. 2. Typing of libraries

The following typing is also relevant for electronic repositories, as it provides easy access to targeted data – namely, scientific and research works of young scientists for specialized corporate libraries.

Research task rationale

Libraries of educational institutions have undergone the greatest reform in recent years due to the introduction of quarantine conditions and modernization of the educational process. [4, 6]. They are actively implementing the latest technologies, increasing the volume of storage and server capacity, which provide storage and access to electronic versions of qualification works of said educational institutions' graduates. This, in turn, leads to improved search algorithms and classification of textual information [5].

The aforementioned proves the relevance of the proposed project to create an electronic library of young scientists' works with the capability for them to communicate and exchange knowledge, to perform further joint research and analyze the state of the most relevant scientific fields as well as to attract young professionals directly to industrial and practical experience corresponding to the fields their of knowledge and interests, providing the possibility of implementing the obtained results into the practice.

Aims and tasks of the work

The aim of the study is to develop a project of an International System of Knowledge Exchange of young scientists (ISKE) through the organization of a community of people with certain scientific interests, their further communication and integration into international research projects.

To achieve this goal, the system must provide the following functionality:

- scalability of the data storage solution;
- guarantee of the integrity, reliability, confidentiality and fault tolerance of the system;
- implementation of processing of various types of search queries (voice, text, scanned and photo media);
- implementation of accelerated data search in the system, based on the specified area of user interest;
- a high degree of accuracy and completeness of the division of records into classes with determining the most pressing tasks and problems;
- in-depth analysis of uploaded work to group possible research teams;
- creation of a virtual room for research teams, sharing results, discussing research prospects with anticipation of the possibility of communication of different languages native speakers.

ISKE provides the opportunity to scale and internationalize the research.

Task fulfillment

Schematic conceptual representation of the proposed ISKE is shown in Fig. 3. The system is able to operate in two main modes – the data accumulation and processing mode and access mode. The constituent elements of the system are:

- scalable cloud storage;
- high-performance computing module for text documents vectorization;
- high-performance computing module for determining the text proximity of documents;
- graphical user web-interface;
- additional utility services.

The data collection and processing mode provides the formation of a repository of qualification and research papers in a structured form. The operation of this mode is to perform the following steps:

- uploading qualification works in docx or pdf formats to the cloud storage, namely to the buffer that stores unprocessed works;
- allocation in the main repository a separate cell-record for each of them containing the document itself, its author, as well as its metadata – frequency dictionary, etc.;
- text preprocessing (tokenization, removal of punctuation and stop words, lemmatization of text, etc.);
- creation of the frequency dictionary of the sample using the basis of the processed texts (Radix sorting is chosen as sorting method for terms) and finally placement of the received data in the main storage; moreover, if the system had already processed documents, the frequency dictionary gets rebuilt again from the start.

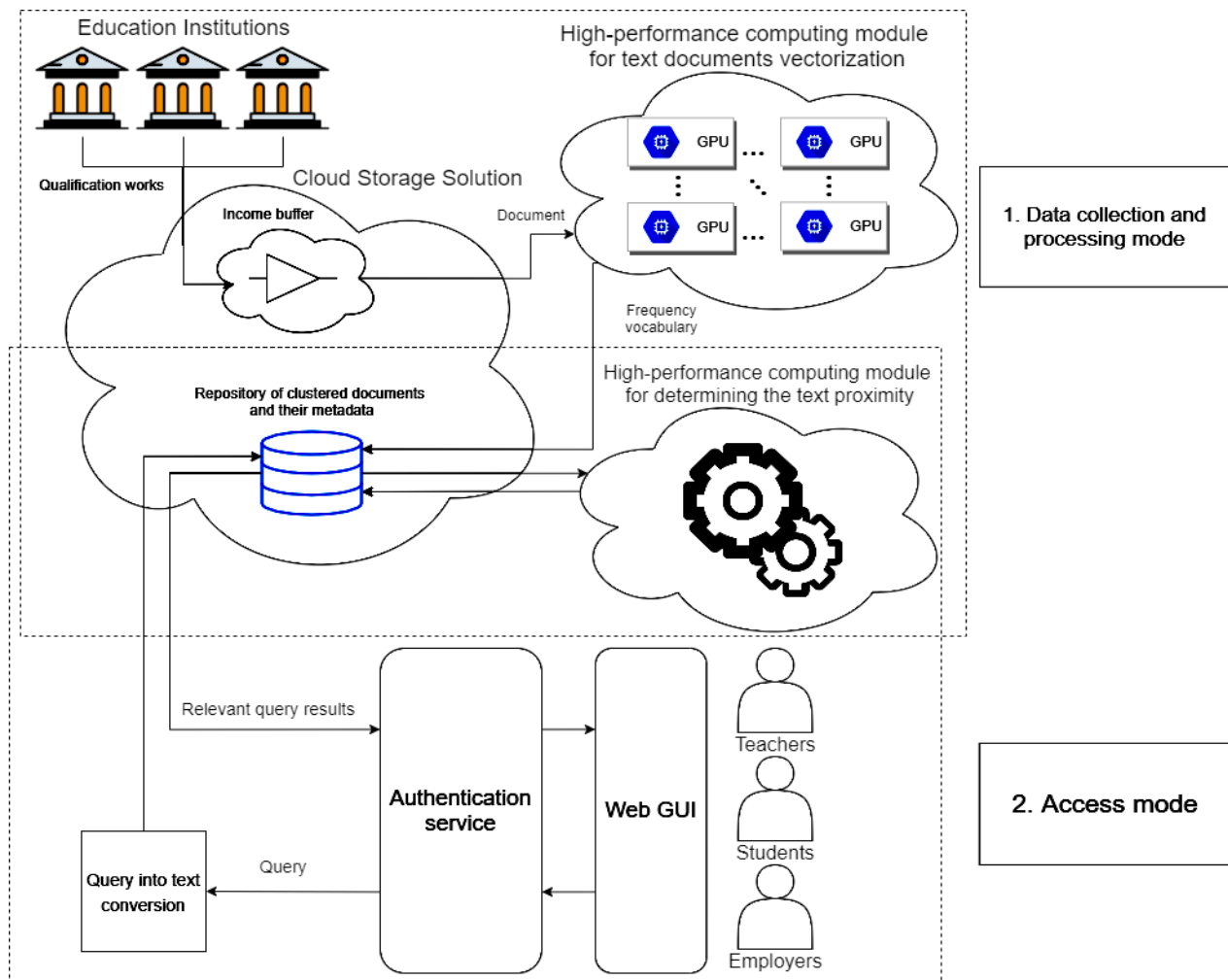


Fig. 3. The general scheme of proposed ISKE

- comparative analysis of the frequency dictionary of a sample;

- clustering of documents, i.e. assigning to all of them a specific value of proximity to other documents, on the basis of which clusters of semantically similar texts are formed, which are combined into groups.

Meanwhile, the second mode (access) consists of setting up and applying an authentication system and access rights, which affects the ability to view and search texts, as the system is designed for several groups of users depending on their status (student, teacher or employer). The system also takes into account the boundaries of different educational institutions to ensure the integrity and confidentiality of information, i.e. a user from one institution will not have access to non-public documents of another institution. The access itself is available through a web interface and has the search by keywords functionality, using the formed text relations when determining the relevant results for the query. The available query formats range from both text and voice to image format (scan), as all formats are converted to text using appropriate detection and data processing methods.

The functioning of the proposed ISKE is impossible without the accumulation of data and cataloging of new works that come regularly several times a year in large quantities (depending on the

educational institution). Therefore, the solution to the problem of documents classification is one of the main tasks that affects the efficiency and speed of ISKE.

Research of influence of datasets statistical properties on classification result

The methods of pre-processing and text preparation have a great influence on the results of classification, which necessitates the study of source data pre-processing methods such as stop words removal, stemming and lemmatization. A training dataset of 4,725,865 sentences was prepared for the study. Of these, 153254 sentences describe the problem of natural language processing with the most commonly used words shown in Figure 4.

The rest (4572611 sentences) do not relate to the given problem; The most commonly used words are the words in Figure 5. The sample shows that there are a large number of noise words (get, one, can't, still), which can worsen the learning outcomes of classifiers. The validation date set is 92,000 sentences.

The paper investigates the influence of preprocessing methods (cleaning the text from words and symbols based on established rules; lemmatization and stemming) on the work of text classification methods such as Logistic Regression, LSTM, BERT, LightGBM.

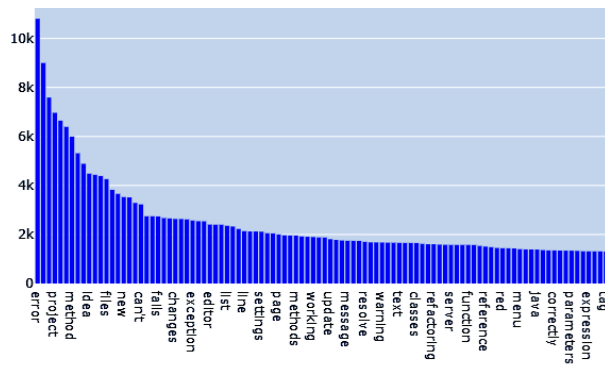


Fig. 4. The number of occurrences of words in the dataset from the problem area

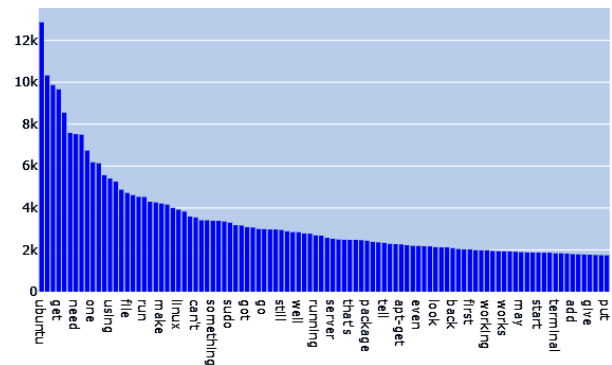


Fig. 5. The number of occurrences of words in the dataset from the non-problem area

A study was conducted on the speed of classification and F1 assessment. All the above classifiers worked on a validation sample of 92,000 sentences; the average number of characters in a sentence was 54.

The results of deleting stop words and symbols, frequently or little used punctuation words, and deleting POS tagging based on rule-based algorithms are shown in Table 1.

The efficiency of Logistic Regression, LSTM, BERT, LightGBM classifiers after text cleaning is set on the basis of F1-score, which allows to combine

accuracy and completeness estimates and is given in table 2. Based on the experiments using different methods of clearing the text from the characters, the drawn conclusions is shown in table 3.

Table 1 – Research of the text clearing runtime

Method name	Execution speed in seconds
Stop words removal	1.17
Frequently or little used words deletion	1.62
Punctuation deletion	2.87
POS tagging deletion	4.70

Table 2 – Study of F1-assessment of classification based on Logistic Regression, LSTM, BERT, LightGBM classifiers after performing data cleaning in the text

Preprocessing stage	Classification method	F1 assessment
Baseline	Logistic Regression	0.71
	LightGBM	0.63
	LSTM	0.73
	BERT	0.9
Stop words removal	Logistic Regression	0.63
	LightGBM	0.50
	LSTM	0.65
	BERT	0.75
Frequently or little used words deletion	Logistic Regression	0.65
	LightGBM	0.55
	LSTM	0.7
	BERT	0.73
Punctuation deletion	Logistic Regression	0.72
	LightGBM	0.71
	LSTM	0.75
	BERT	0.8
POS tagging deletion	Logistic Regression	0.75
	LightGBM	0.7
	LSTM	0.73
	BERT	0.74

Table 3 – Conclusions on the influence of the stages of text cleaning on the result of the classifier

Classification method	Conclusion
Logistic Regression	Removing the POS tagging is the most influential and effective step in clearing text for this classification method.
LightGBM	Removing punctuation has the best effect on the performance of this classification method.
LSTM	Removing POS tagging is the most influential and effective method of clearing text for this classification method.
BERT	Cleaning the text negatively affects the quality of the classification. To improve the result of the model, it was decided not to perform text clearing of the dataset for this classification method.

The results of the experiments on the runtime of lemmatization and stemming for the validation date set of 92,000 sentences with an average number of words in a sentence of 54, are shown in table 4.

Table 4 – Research of runtime of lemmatization and stemming

Method name	Execution time in seconds
Stemming	9.8
Lemmatization	4.46

The obtained results showed that the speed of the lemmatization operation is twice as high as the time of the stemming.

Based on the experiments, the F1-assessment was measured on the basis of a validation dataset to determine the effectiveness of the Logistic Regression, LSTM, BERT, LightGBM classifiers after performing

lemmatization and stemming operations. The results are shown in table 5.

Lemmatization and stemming improved the evaluation of Logistic Regression, LSTM and LightGBM classification methods on the validation dataset. For BERT, the score deteriorated slightly after performing lemmatization, which confirms the absence of the need to process the text when submitting it to the BERT classifier. Taking into account the results of table 4, the execution of lemmatization at the stage of preprocessing gives the result with high speed and efficiency for all these classifiers, except BERT.

Lemmatization showed a shorter execution time compared to stemming by almost twice and a better score by an average of 5 percent, so it was decided to use the Logistic Regression classifier with lemmatization at the stage of text preparation in the subsequent operation of the proposed ISKE.

Table 5 – Study of F1-assessment of classification based on classifiers Logistic Regression, LSTM, BERT, LightGBM after lemmatization and text stemming

Method name	Model name	F1 assessment
Baseline	Logistic Regression	0.71
	LightGBM	0.63
	LSTM	0.73
	BERT	0.9
Stemming	Logistic Regression	0.8
	LightGBM	0.75
	LSTM	0.8
	BERT	-
Lemmatization	Logistic Regression	0.81
	LightGBM	0.75
	LSTM	0.8
	BERT	0.72

Conclusion

The paper proposes a system which is electronic data storage (of qualification works of students from different countries) and provides the capability to identify and connect young scientists conducting research on a related problem area.

The purpose of developing this system is to provide opportunities for knowledge exchange, research in a team on a common problem, as well as to identify scientific trends in different countries. The system is able to operate in two main modes – the data accumulation and processing mode and access mode. During access mode available query formats range from both text and voice to image format (scans or photo), as

well as the possibility of accelerated data search throughout the system.

The paper investigates the influence of preprocessing methods (cleaning the text from words and symbols based on established rules; lemmatization and stemming) on the work of text classification methods such as Logistic Regression, LSTM, BERT and LightGBM. A study was conducted on the speed of classification and F1 assessment. Lemmatization showed a shorter execution time compared to stemming by almost twice and a better score by an average of 5 percent, so it was decided to use the Logistic Regression classifier with lemmatization at the stage of text preparation in the subsequent operation of the proposed ISKE.

REFERENCES

1. Zaiceva, S. and Barkovska, O. (2020), "Analysis of Accelerated Problem Solutions of Word Search in Texts", *The Fourth International Scientific and Technical Conference «COMPUTER AND INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES»*, KhNURE, Kharkiv, p.66, DOI: <https://doi.org/10.30837/IVcsitic2020201445>.
2. Barkovska, Olesia, Mikhal, Oleg, Pyvovarova, Daria, Liashenko, Oleksii, Diachenko, Vladyslav and Volk, Maxim (2020), "Local Concurrency in Text Block Search Tasks", *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, Vol. 8. No. 3, March, pp. 690-694, DOI: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/13832020>.
3. Barkovska, O., Pyvovarova, D. and Serdechnyi, V. (2019), "Accelerated word-image search algorithm in text with adaptive decomposition of input data", *Systemy upravlinnja, navigacijy ta zv'jazku*, Vol. 4 (56), pp. 28-34, DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.4.028> (in Ukrainian).
4. Vuksanović, Petrijevcinjanin and Sudarević, B. (2010), "Migration process and data modeling in National and University Library in creating ILS", *Proceedings ELMAR-2010*, Zadar, Croatia, pp. 155-158.

5. Puritat, K. and Intawong, K. (2020), "Development of an Open Source Automated Library System with Book Recommendation System for Small Libraries", *2020 Joint International Conference on Digital Arts, Media and Technology with ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering (ECTI DAMT & NCON)*, Pattaya, Thailand, pp. 128-132, DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTIDAMTNCN48261.2020.9090753>.
6. Bhushan, S. and Weingroff, M. (2005), "Tools for managing collaboration, communication, and website content development in a distributed digital library community", *Proceedings of the 5th ACM/IEEE-CS Joint Conference on Digital Libraries (JCDL '05)*, Denver, CO, USA, pp. 401-401, DOI: <https://doi.org/10.1145/1065385.1065504>.

Received (Надійшла) 25.11.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.02.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

- 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, Associate Professor of the 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** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Vladyslav Kholiev – student of 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>.
- Пивоварова Дар'я Ігорівна** – асистент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Daria Pyvovarova – Assistant lecturer of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: daria.pyvovarova@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7251-994X>.
- Івашенко Георгій Станіславович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Georgiy Ivaschenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: heorhii.ivashchenko@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1027-5262>.
- Росінський Дмитро Миколайович** – старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Dmytro Rosinskiy – Senior Lecturer of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: dmytro.rosinskiyi@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0725-392X>.

Система обміну знаннями молодих науковців із різних країн

О. Ю. Барковська, В. О. Холєв, Д. І. Пивоварова, Г. С. Івашенко, Д. М. Росінський

Анотація. У роботі запропонована система, яка являє електронне сховище даних (кваліфікаційних робіт студентів із різних країн) та забезпечує можливість виявити та зв'язати між собою молодих вчених, що ведуть дослідження над єдиною проблемною областю. **Метою** розробки даної системи є забезпечення можливості обміну знаннями, виконання досліджень у команді над спільною проблемою, а також визначення наукових тенденцій у різних країнах світу. У роботі досліджено вплив методів препроцесінгу на роботу таких класифікаторів, як Logistic Regression, LSTM, BERT, LightGBM. Проведено дослідження щодо швидкості класифікації та F1 оцінки. **Висновки.** Лематизація показала короткий час роботи у порівнянні зі стемінгом майже в два рази та кращу оцінку в середньому на 5 відсотків, тому було прийнято рішення використовувати класифікатор Logistic Regression із лематизацією на етапі підготовки тексту у подальшій роботі запропонованої системи обміну знаннями молодих науковців.

Ключові слова: система; NLP; текст; обробка; прискорення; шингли; близькість; подібність; класифікація; попередня обробка; лематизація; стемінг.

Система обмена знаниями молодых ученых из разных стран

О. Ю. Барковская, В. А. Холєв, Д. И. Пивоварова, Г. С. Иващенко, Д. М. Росинский

Аннотация. В работе предложена система, которая представляет электронное хранилище данных (квалификационных работ студентов из разных стран) и обеспечивает возможность выявить и связать между собой молодых ученых, ведущих исследования над единой проблемной областью. **Целью** разработки данной системы является обеспечение возможности обмена знаниями, проведения исследований в команде над общей проблемой, а также определение научных тенденций в разных странах мира. В работе исследовано влияние методов препроцессинга на работу таких классификаторов, как Logistic Regression, LSTM, BERT, LightGBM. Проведено исследование скорости классификации и F1 оценки. **Выводы.** Лемматизация показала меньшее время работы по сравнению со стеммингом почти в два раза и лучшую оценку на 5%, поэтому было принято решение использовать классификатор Logistic Regression с лемматизацией на этапе подготовки текста в дальнейшей работе предложенной системы обмена знаниями ученых.

Ключевые слова: система; NLP; текст; обработка; ускорение; шинглы; близость; сходство; классификация; предварительная обработка; лемматизация; стемминг.

А. В. Кобзєв, М. В. Мурзін

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

ПОКАЗНИКИ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ У ПЕЛЕНГАТОРНІЙ МЕРЕЖІ HF ДІАПАЗОНУ

Анотація. Проводиться оцінка граничних можливостей по точності визначення координат джерел радіовипромінювання у пеленгаторній мережі HF діапазону при розміщенні її на території України. Виводяться розрахункові співвідношення для обчислення робочих зон визначення координат джерел радіовипромінювання і обговорюються результати розрахунків при мінімально можливому числі пеленгаторів мережі (3, 4), що забезпечують круговий контроль простору. Результати розрахунків робочих зон відображають граничні можливості по точності визначення координат, оскільки характеристики мережі (просторовий рознос пеленгаторів і реальна точність пеленгації) обрані гранично можливими.

Ключові слова: пеленгаторна мережа; граничні можливості по точності; координати джерела радіовипромінювання; розміщення пеленгаторів; контроль радіовипромінювань.

Вступ

Пеленгаторна мережа (ПМ) являє собою систему з кількох (два і більше) рознесених у просторі станцій (пеленгаторів), кожна з яких здійснює пошук радіовипромінювань у заданому діапазоні частот, аналіз виявлених сигналів і вимірювання кутових координат (пеленгацію) джерел радіовипромінювання (ДРВ). Отримані дані передаються на загальний пункт обробки інформації, де вирішується завдання визначення просторових координат ДРВ. Пеленгаторні мережі знайшли застосування в системах радіомоніторингу, радіорозвідки і пасивної радіолокації [1-8].

Функціонування ПМ у короткохвильовому (HF) діапазоні (3 - 30 МГц) має ряд особливостей, обумовлених специфічними умовами поширення радіохвиль. Тут, перш за все, слід відзначити великі дальності дії пеленгаторів (до декількох тисяч км) за рахунок іоносферного поширення радіохвиль і високої чутливості приймачів вузькосмугових сигналів. Крім того, відстані між пеленгаторами можуть становити сотні і тисячі кілометрів. При розробці розрахункових співвідношень для показників точності координатної інформації ПМ наведені особливості змушують враховувати кривизну Землі. Тому розрахунки необхідно проводити з урахуванням сферичності поверхні розташування пеленгаторів і ДРВ, та використовувати геоцентричну або географічну систему координат. Початкові дані про координати ДРВ прийнято представляти в географічній системі (широта, довгота).

У відомих роботах, де розглядаються питання аналізу показників точності пеленгаційного методу визначення місця розташування завжди розглядають розташування пеленгаторів і ДРВ на плоскій поверхні [1-3, 5, 6]. При цьому часто обмежуються варіантом системи з двох пеленгаторів [1, 5]. У відомих публікаціях відсутні розрахункові співвідношення, що є придатними для аналізу точності визначення місця розташування ДРВ пеленгаційним методом в географічній системі координат і дозволяють оцінювати граничні

можливості ПМ за показниками точності при розміщенні їх на території України.

Відома загальна методика розрахунку показників точності визначення координат в радіотехнічних системах різного призначення. Вона викладена в ряді робіт, серед яких слід відзначити [2-4]. Ця методика придатна для аналізу якості координатної інформації в системах з активним і пасивним способами спостереження при будь-якому методі визначення координат (далекомірному, кутомірному-далекомірному, різницево-далекомірному, пеленгаційному і ін.). Розрахунки можна проводити в будь-якій системі координат (декартовій, сферичній, геоцентричній, географічній та ін.). Методика не має обмежень на максимальну кількість вимірюваних первинних параметрів і дозволяє оцінювати точність при наявності надлишкових вимірів. Основою методики є встановлення аналітичного зв'язку первинних параметрів з координатами об'єкта в обраній системі координат і лінеаризації цієї залежності шляхом розкладання в ряд Тейлора в точці дійсного місця розташування об'єкта з обмеженням перших двох членів ряду.

Вперше такий підхід було запропоновано в роботі [1] для різних методів визначення координат при мінімально допустимому числі засобів спостереження. Пізніше такий підхід було поширено на більш загальний випадок [2-4]. Зміст загальної методики в конкретному вигляді буде надалі розкрито на прикладі пеленгаторних мережі HF діапазону.

Мета статті – отримання аналітичних співвідношень для розрахунку показників точності координатної інформації на виході ПМ в досить загальному вигляді та оцінка граничних можливостей по точності визначення координат при розміщенні пеленгаторів на території України. Завдання вирішується в географічній системі координат для довільного числа пеленгаторів (два і більше) і при довільному їх розташуванні на поверхні Землі.

Постановка задачі

Початковими даними для оцінювання точності визначення просторових координат є:

- кількість пеленгаторів M та їх координати на поверхні Землі - широта φ_m та довгота λ_m m -го пеленгатора ($m=1..M \geq 2$);

- значення пеленгів β_m , виміряні кожним пеленгатором на одне і теж ж ДРВ відносно напрямку на північ за меридіаном з довготою λ_m за часовою стрілкою;

- φ, λ – місцеположення (широта і довгота) ДРВ, для якого оцінюється точність місце розташування.

Відомими також будемо вважати показники точності пеленгації у вигляді кореляційної матриці похибок пеленгації $\mathbf{K}$ (розмірністю $M \times M$). Оскільки похибки у різних пеленгаторах не пов'язані між собою, то матриця $\mathbf{K}$ є діагональною з дисперсіями $\sigma_{\beta_m}^2$.

Потрібно визначити показники точності оцінювання широти і довготи ДРВ. Цими показниками є елементи кореляційної матриці похибок оцінювання координат Φ розмірністю 2×2 . Діагональні елементи матриці Φ являють собою дисперсії похибок оцінювання широти $\hat{\sigma}_{11} = \sigma_{\varphi}^2$ та довготи $\hat{\sigma}_{22} = \sigma_{\lambda}^2$. Недіагональні елементи $\hat{\sigma}_{12} = \hat{\sigma}_{21} = \sigma_{\varphi} \sigma_{\lambda} \rho$ характеризують кореляційний зв'язок похибок оцінювання координат.

Розв'язання задачі

Послідовність вирішення задачі є наступною. Встановлюється функціональна залежність $(m=1..M)(m=1..M)$ первинних параметрів β_m від координат у лінійному наближенні. Для цього визначаються коефіцієнти розкладання функції $\beta_m(\varphi, \lambda)$ при других членах ряду Тейлора у вигляді похідних

$$g_{\varphi m} = \frac{\partial \beta_m(\varphi, \lambda)}{\partial \varphi}; \quad g_{\lambda m} = \frac{\partial \beta_m(\varphi, \lambda)}{\partial \lambda}. \quad (1)$$

Сукупність цих похідних наводиться у вигляді прямокутної матриці $\mathbf{G}$ розміром $2 \times M$:

$$\mathbf{G}^T = \begin{bmatrix} g_{\varphi 1} \dots g_{\varphi M} \\ g_{\lambda 1} \dots g_{\lambda M} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Індекс T позначає операцію транспонування векторів і матриць. Кореляційна матриця похибок визначення координат знаходиться за формулою [2-4]:

$$\Phi = (\mathbf{G}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{G})^{-1}. \quad (3)$$

При рівноточних пеленгаційних вимірюваннях з дисперсією похибок σ_{β}^2 отримаємо

$$\Phi = \sigma_{\beta}^2 (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} = \sigma_{\beta}^2 \begin{bmatrix} \sum_m g_{\varphi m}^2 & \sum_m g_{\varphi m} g_{\lambda m} \\ \sum_m g_{\varphi m} g_{\lambda m} & \sum_m g_{\lambda m}^2 \end{bmatrix}^{-1}. \quad (4)$$

Точність визначення двовірних просторових координат часто характеризують лінійною середньоквадратичною похибкою (ЛСКП) [1, 4], яка для розглядаемого випадку є рівною

$$\sigma_L = \sqrt{\sigma_{\varphi}^2 + \sigma_{\lambda}^2}. \quad (5)$$

Всі кутові величини у розрахункових формулах повинні представлятися у радіанній мірі. Тому ЛСКП (5) також буде мати розмірність у радіанах (у градусах), що незручно для розуміння результатів розрахунку.

Більш наглядним способом відображення розрахункових даних є представлення ЛСКП у вигляді відстаней між справжнім положенням ДРВ та виміряним. Для цього необхідно провести перерахунок кутової величини σ_L у відстань по поверхні Землі. Алгоритм перерахунку буде наведено нижче.

Наведемо порядок виведення розрахункових формул у відповідності з рівняннями (1)-(3). Встановимо спочатку залежність $\beta_m(\varphi, \lambda)$. Для цього використаємо рис. 1, де відображено взаємне положення m -го пеленгатора (Δ) та ДРВ ($\bullet$) на поверхні Землі у вигляді полярного сферичного трикутника.

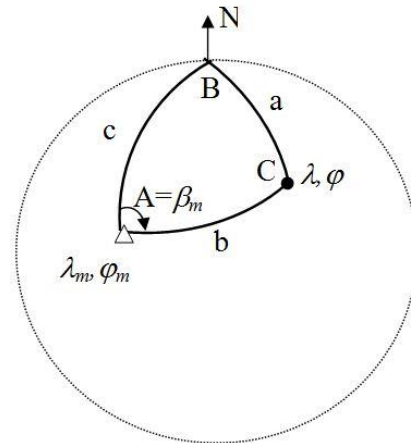


Рис. 1. Взаємне положення m -го пеленгатора (Δ) и ДРВ ($\bullet$)
(Fig. 1. Mutual position of the m -th direction finder (Δ) and the radio emission source ($\bullet$))

Буквами А, В, С позначено кути трикутника, протилежні відповідним сторонам а, b, с. Вершина кута В співпадає з положенням північного полюса. Сторони трикутника а, b, с є дугами великого круга і характеризуються кутовими розмірами дуг. Дуга b з'єднує m -й пеленгатор з точкою місця розташування ДРВ. При відомому куті b відстань між ними по поверхні Землі можна визначити так ($R_{\text{с}} = 6731 \text{ км}$ – середній радіус Землі, b вимірюється у радіанах). Виразимо кут $\hat{A} = \beta_m$

через відомі величини, що містять координати φ, λ , що оцінюються. Для цього скористаємось співвідношеннями із сферичної тригонометрії [9]. З формули для котангенсів кутів знайдемо тангенс кута

$$\operatorname{tg}(A) = \frac{\sin(a)\sin(B)}{\sin(c)\cos(a) - \cos(c)\sin(a)\cos(B)}. \quad (6)$$

Всі кутові величини, що входять до правої частини (6), відомі з початкових даних і рівні $\hat{a} = \pi/2 - \varphi$, $\hat{b} = \pi/2 - \varphi_m$, $B = \lambda - \lambda_m$. Підставляючи їх до (6), отримаємо вираз для кута:

$$\beta_m(\varphi, \lambda) = \arctg \left[\frac{u_m(\varphi, \lambda)}{v_m(\varphi, \lambda)} \right] = \arctg \left[\frac{\cos(\varphi)\sin(\lambda - \lambda_m)}{\cos(\varphi_m)\sin(\varphi) - \sin(\varphi_m)\cos(\varphi)\cos(\lambda - \lambda_m)} \right]. \quad (7)$$

Тут для скорочення запису чисельник та знаменник у квадратних дужках позначені функціями $v_m(\varphi, \lambda)$, $u_m(\varphi, \lambda)$.

Після диференціювання (7) за координатами φ та λ знаходимо елементи матриці **G**

$$g_{\varphi m} = \frac{-\sin(\varphi)\sin(\lambda - \lambda_m)v_m(\varphi, \lambda)}{u_m^2(\varphi, \lambda) + v_m^2(\varphi, \lambda)} - \frac{\cos(\varphi_m)\cos(\varphi) + \sin(\varphi_m)\sin(\varphi)\cos(\lambda - \lambda_m)}{(u_m^2(\varphi, \lambda) + v_m^2(\varphi, \lambda)) \cdot (u_m(\varphi, \lambda))^{-1}}, \quad (8)$$

$$g_{\lambda m} = \frac{\cos(\varphi)\cos(\lambda - \lambda_m)v_m(\varphi, \lambda)}{u_m^2(\varphi, \lambda) + v_m^2(\varphi, \lambda)} - \frac{\sin(\varphi_m)\cos(\varphi)\sin(\lambda - \lambda_m) \cdot u_m(\varphi, \lambda)}{u_m^2(\varphi, \lambda) + v_m^2(\varphi, \lambda)}. \quad (9)$$

У подальшому використовуються формули (3), (4), (5). Отриманий результат буде характеризувати точність визначення місця розташування ДРВ тільки в одній точці на поверхні Землі. Цікавою є загальна просторова картина для показників точності ПМ. Існує кілька способів графічного представлення показників точності в залежності від місця розташування ДРВ. Наприклад, у деяких роботах [1, 3, 5] для цієї мети використовують еліпси похибок або графіки залежності ЛСКП від дальності до ДРВ для різних напрямків. При побудові еліпсів похибок для двокоординатного випадку виходять з того, що двовимірна щільність розподілу ймовірностей похибок визначення координат $\Delta_\varphi, \Delta_\lambda$ підпорядкована нормальному закону. При цьому еліпс похибок відповідає області простору [4], в яку потрапляють похибки з імовірністю не менше величини

$$P_\Delta(k) = 1 - \exp(-k^2/2). \quad (10)$$

Тут величина k визначає розміри півосей еліпса, які дорівнюють $k\sigma_\varphi, k\sigma_\lambda$. Для перерахунку розмірів еліпса, виражених у кутових величинах, у

відстань по поверхні Землі слід використовувати формулу сферичної тригонометрії [9] для відстані між точками з координатами φ, λ та $\varphi + k\sigma_\varphi, \lambda + k\sigma_\lambda$. В результаті отримаємо вираз для ЛСКП в одиницях відстаней

$$\sigma_r = R_z \arccos \left[\frac{\sin(\varphi)\sin(\varphi + k\sigma_\varphi) + \cos(\varphi)\cos(\varphi + k\sigma_\varphi)\cos(k\sigma_\lambda)}{1} \right]. \quad (11)$$

Наочним способом представлення показників точності є відображення робочих зон [1, 5]. Робочою зоною називають область простору, в межах якої ЛСКП σ_r не перевищує деякого заданого значення σ_0 . Іншими словами на кордоні робочої зони виконується рівність $\sigma_r = \sigma_0$. Відображення показників точності за допомогою робочих зон дає можливість проводити порівняльний аналіз і оцінювати якість координатної інформації для різних варіантів розміщення пеленгаторів при будь-якому напрямку спостереження (наприклад, у кругову).

Для розрахунку робочих зон можна рекомендувати наступний підхід. Вибирається точка на поверхні Землі з координатами φ_0, λ_0 , яка буде служити початком відліку параметрів робочої зони. Для цього можна вибрати точку, що відповідає центру розміщення ПМ або координатам одного з пеленгаторів. Далі використовується координатна система азимут-дальність β, D , в якій простір розбивається з кроком $\delta\beta$ на N азимутів $\beta_n (n = 1..N)$, відлік яких ведеться з точки φ_0, λ_0 щодо напрямлення на північ за меридіаном з довготою λ_0 . Потім в кожному напрямку β_n знаходиться відстань D_n по поверхні Землі, при якому виконується така рівність:

$$f(D_n / \beta_n) = \sigma_r(D_n / \beta_n) - \sigma_0 = 0. \quad (12)$$

Шаг $\delta\beta$ можна вибирати, виходячи з бажаної точності представлення робочої зони. Достатньою можна вважати величину $\delta\beta = 4^\circ..6^\circ$. Координати β_n, D_n і є межею робочої зони.

При комп'ютерних розрахунках знайти D_n при заданому азимуті β_n , що задовольняє рівності (12), можливо різними шляхами. Наприклад, можливо знайти рішення нелінійного рівняння (12), задавши початкове наближення D_0 , чи шляхом зміни D знаходити точку переходу функції $f(D/\beta_n)$ через 0. Зазвичай робочі зони розраховуються для декількох значень σ_0 . Для проведення обчислень доцільно використовувати наступні додаткові до операційної системи Windows математичні програмні продукти, а саме Mathcad чи Matlab. В додатку Matlab у більш пізніх версіях реалізовано можливість накладення результатів розрахунку робочих зон на географічну карту за допомогою команди `geoplot ([φ],[λ])`, що підвищує наочність

відображення. При цьому необхідно перейти від координат D_n , β_n до координат φ_n , λ_n , використовуючи співвідношення зі сферичної тригонометрії [9].

Оцінка граничної точності визначення координат при розміщенні пеленгаторів на території України

При створенні ПМ прагнуть виконати наступні суперечливі вимоги [11, 12]:

1. Точність визначення координат ДРВ повинна бути максимально можливою в широкому секторі спостереження (наприклад, у круговій зоні).

2. З точки зору матеріальних витрат число пеленгаторів мережі повинно бути найменшим. Найменшим можна вважати таке число, при якому подальше нарощування кількості пеленгаторів стає недоцільним внаслідок незначного підвищення точності.

Відзначимо ті обставини, які обмежують можливості щодо виконання зазначених вимог. Відомо, що точність визначення координат залежить від точності пеленгації і відстані між пеленгаторами (бази) [1,2,5,6]. Мінімальні СКП пеленгації обмежені можливостями техніки, яка використовується у ПМ. Чим більше рознесені пеленгатори на місцевості, тим вище точність. Обмеження на просторовий рознос пеленгаторів наземної ПМ обумовлені кінцевими розмірами території, де допускається розміщення пеленгаторів. Іншими словами рознос пеленгаторів не може бути більше розмірів території країни, якщо у ПМ не використовуються корабельні пеленгатори. Виконання другої вимоги пов'язано також з вимогами до зони контролю простору. Як відомо, ПМ з мінімально необхідною кількістю пеленгаторів (два) дозволяє визначати координати з допустимою точністю тільки в двох протилежних секторах шириною приблизно $\pm 60^\circ$ відносно перпендикуляра до середини лінії бази [1, 2, 7]. Щоб похибки визначення координат були найменшими і робоча зона охоплювала всі напрямки, в складі ПМ необхідно мати декілька пеленгаторів (не менше 3-х) з максимальними відстанями між ними як за широтою, так і за довготою.

Розглянемо можливості виконання зазначених вище вимог відносно території України і оцінимо граничні можливості з визначення координат ДРВ в наземній ПМ. Якщо елементи ПМ розмістити поблизу державного кордону на заході, півночі, сході і на узбережжі, то можна реалізувати найкращі показники точності координатної інформації при будь-якому напрямку на ДРВ. Відзначимо, що протяжність території України від західного кордону до східного становить величину близько 1200 км, а від північного кордону до узбережжя Чорного моря майже в 2 рази менше (близько 670 км). Саме ці величини визначають максимально можливий взаємний рознос пеленгаторів. Якщо усі пеленгатори розташувати поблизу державних кордонів України, то більш високу точність

визначення координат слід очікувати для ДРВ, що знаходяться в північному і південному напрямках.

Розглянемо 3 варіанти розміщення пеленгаторів з максимальним рознесенням на території України і оцінимо граничні можливості ПМ по точності визначення координат. Будемо вважати при цьому, що реальна точність пеленгації всіх пеленгаторів однакова і характеризується величиною СКП $\sigma_\beta = 1,5^\circ$. Така точність відповідає найкращим зразкам сучасної техніки пеленгації у HF діапазоні. Зокрема, до такої техніки відносяться пеленгатори DDF1GTX фірми Rohde&Shwarz (Германія) [13] і пеленгатор «Восток-ОПК», розроблений Науково-технічним центром радіотехнічних систем Академії наук прикладної радіоелектроніки (м. Харків) [14]. На точність пеленгації істотно впливає середовище поширення радіохвиль (іоносфера), параметри якої можуть змінюватися протягом короткого відрізка часу (наприклад, швидкі завмирання сигналів) [7, 10]. Одним з ефективних способів підвищення точності пеленгації є використання систем з кільцевими антенними решітками великих розмірів (діаметром до 150 м) і кореляційно-інтерферометричного способу вимірювання пеленгів [8, 13, 14], а також багаторазове вимірювання з наступним усередненням результатів [5]. В якості початкових даних при розрахунках робочих зон виберемо $k^2 = 2$, що відповідає ймовірності попадання похибок $P_\Delta = 0,63$ у еліпс з напіввісьми $k\sigma_\sigma, k\sigma_\lambda$.

На рис. 2 відображені гіпотетичні варіанти розташування пеленгаторів у прикордонних районах України у вигляді спеціальних символів.

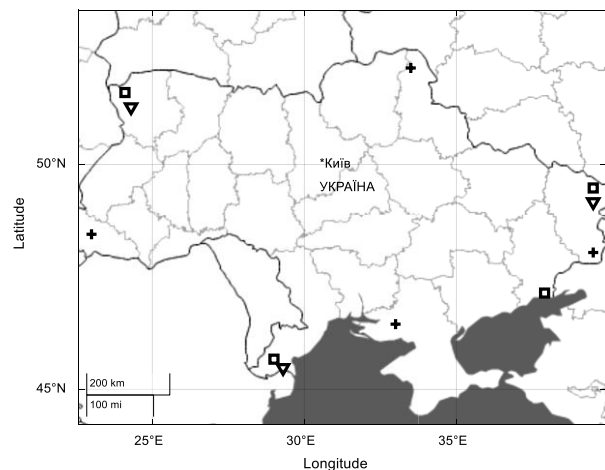


Рис. 2. Варіанти розміщення пеленгаторів на території України

(Fig. 2. Location variants of direction finders on the territory of Ukraine)

Варіант №1 відповідає ПМ з 3-х пеленгаторів, розташованих у вершинах трикутника і позначених символом ∇ . Один з пеленгаторів встановлений біля північно-західного кордону, інший - на північному-сході, а третій - на південному сході. Варіант №2 позначений квадратами $\square$ і відрізняється від

варіанту №1 тим, що доданий 4-ий пеленгатор з місцем розташування на південному сході. Варіант №3

(символ +) відноситься до ПМ з 4-х пеленгаторів, позиції яких знаходяться поблизу кордонів на заході, сході, півночі і півдні країни.

Результати розрахунків робочих зон нанесено на географічну карту і наведено на рис. 3 – 5. На цих рисунках відображені робочі зони для трьох варіантів побудови ПМ для значень $\sigma_0 = 50, 100$ та 200 км. Номера кривих вказують на номери варіантів. З рисунків видно, що відмінності робочих зон за розмірами несуттєві. Тут найбільший внесок в точність дають два пеленгатора, розташовані біля західного та східного кордонів.

Наведені дані ілюструють можливості ПМ за точністю визначення координат при знаходженні ДРВ в різних регіонах Європи. Так, зокрема, координати кораблів у Чорному морі з випромінюючими радіостанціями HF діапазону можуть визначатися з ЛСКП менше 50 км.

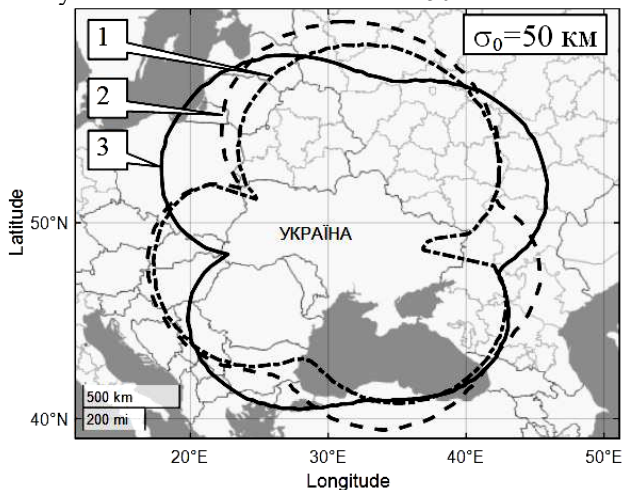


Рис. 3. Робочі зони для трьох варіантів ПМ при $\sigma_0=50$ км
(Fig. 3. Working areas for three variants of direction finding networks at $\sigma_0=50$ km)

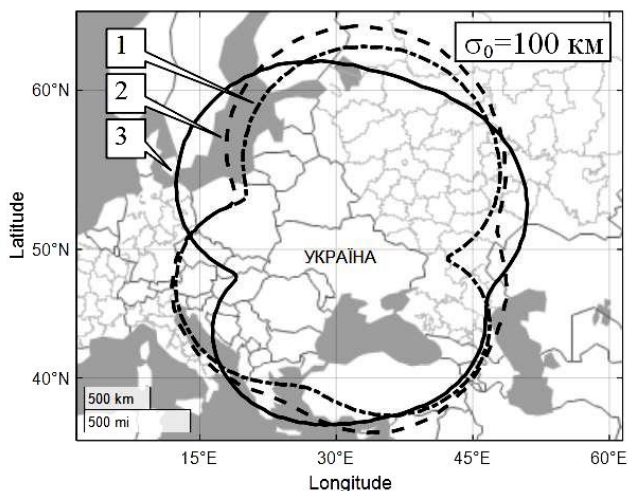


Рис. 4. Робочі зони для трьох варіантів ПМ при $\sigma_0=100$ км
(Fig. 4. Working areas for three variants of direction finding networks at $\sigma_0=100$ km)

of direction finding networks at $\sigma_0=100$ km)

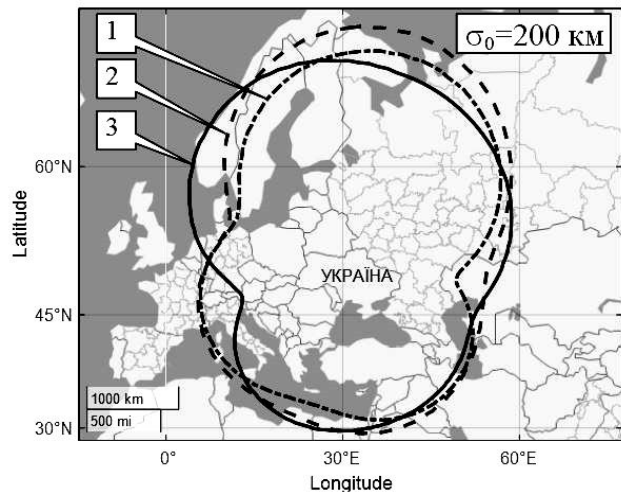


Рис. 5. Робочі зони для трьох варіантів ПМ при $\sigma_0=200$ км
(Fig. 5. Working areas for three variants of direction finding networks at $\sigma_0=200$ km)

Для кораблів в Середземному морі ця величина може мати значення до 200 км.

Щоб оцінити розміри територій, які покривають робочі зони, на рис. 6 наведені ті ж дані, що і на попередньому рисунку, але в координатах відстаней по поверхні Землі. Точкою відліку відстаней обраний центр України (Черкаська обл.; $\phi_0 = 49^\circ$, $\lambda_0 = 31^\circ$).

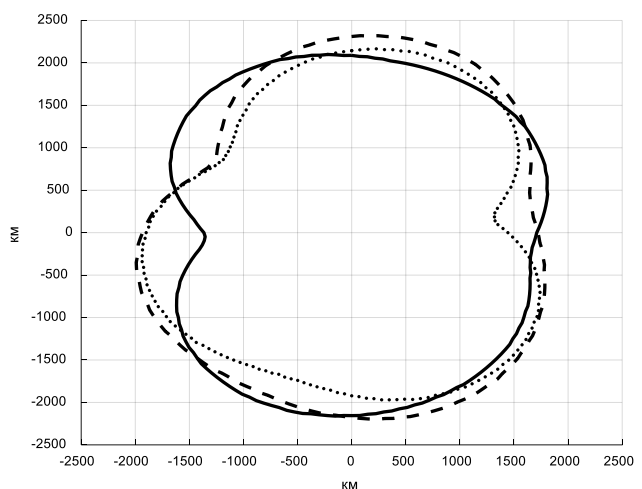


Рис. 6. Робочі зони ПМ при $\sigma_0=200$ км у координатах відстаней до ДРВ
(Fig. 6. Working areas of direction finding networks at $\sigma_0=200$ km in coordinates distance to radio sources)

Як і слід було очікувати, найбільша точність координатної інформації для всіх варіантів досягається у північному і південному напрямках. Результати розрахунків для ПМ з 5 пеленгаторами, показали, що додаткове використання 5-го пеленгатора незначно покращує точність визначення місця розташування.

Для кількісного порівняння варіантів в таблиці 1 наведені площі робочих зон,

представлених на рис. 3-5.

З наведених даних видно, що найбільшу площу має робоча зона пеленгаторної мережі, що побудована за варіантом №2.

Однак її перевищення над іншими не настільки істотне, щоб відкинути можливість використання варіантів №1, 3.

Таблиця 1 – Площі робочих зон для трьох варіантів пеленгаторної мережі при трьох значеннях σ_0

σ_0 , км	Варіант №1	Варіант №2	Варіант №3
$\sigma_0=50$	$2,52 \cdot 10^6$ км ²	$3,1 \cdot 10^6$ км ²	$2,95 \cdot 10^6$ км ²
$\sigma_0=100$	$5,44 \cdot 10^6$ км ²	$6,37 \cdot 10^6$ км ²	$6 \cdot 10^6$ км ²
$\sigma_0=200$	$11,3 \cdot 10^6$ км ²	$13 \cdot 10^6$ км ²	$12,1 \cdot 10^6$ км ²

Наведені результати дозволяють зробити висновок про те, що варіант №1 (три пеленгатора в складі пеленгаторної мережі) може виявитися кращим, оскільки він забезпечує найменші матеріальні витрати при незначних втратах в точності в порівнянні з використанням 4 пеленгаторів.

Висновки

Розрахунки робочих зон пеленгаторної мережі HF діапазону при розміщенні її на території України проведено для випадку найменших реальних похибок пеленгації, а взаємний просторовий рознос пеленгаторів обраний гранично допустимим.

Тому можна вважати, що результати розрахунків відображають граничні можливості по точності визначення координат ДРВ для такої пеленгаторної мережі при мінімальному числі пеленгаторів (3 або 4). Наведена вище методика обчислення робочих

зон дозволяє для забезпечення найкращих показників точності вибирати конкретний варіант розміщення пеленгаторів на території країни з урахуванням впливу всіх факторів (придатності позицій, наявності під'їзних шляхів, умов розміщення обслуговуючого персоналу і ін.). Вона може бути також використана для інших систем пасивної радіолокації з пеленгаційним методом визначення координат, коли необхідно враховувати сферичний характер Землі.

Зокрема, до такої системи можна віднести два і більше літака повітряної розвідки з пеленгаторами на борту, а також один літак або безпілотний апарат, що здійснюють визначення координат методом багаторазової пеленгації на маршруті польоту [6, 7].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сайбель А.Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения. Москва: Гос. изд. оборонпром, 1953. 53 с.
2. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. Москва: Радио и связь, 1981. 416 с.
3. Don J. Torrieri. Statistical Theory of Passive Location Systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1984. Vol. AES-20, no. 2. P. 183–198.
4. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. Москва : Радио и связь, 1993. 416 с.
5. Кукес И.С., Старик М.Е. Основы радиопеленгации. Москва: Сов. радио, 1964. 640 с.
6. Ankit Jain. Detection on HF radio transmitters using passive geolocation techniques. Brest, France, January, 2019. URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02133926>.
7. Introduction into Theory of Direction Finding. URL: https://cdn.rohde-schwarz.com/us/campaigns_2/a_d/Introduction-Into-Theory-of-Direction-Finding.pdf.
8. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг – задачи, методы, средства. Москва : Горячая линия-Телеком, 2010. 624 с.
9. Степанов Н.Н. Сферическая тригонометрия. Москва : ОГИЗ, 1948. 155 с.
10. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. Москва : Связь, 1972. 336 с.
11. Мельников Ю.П. Воздушная радиотехническая разведка (методы оценки эффективности). Москва : Радиотехника, 2005. 304 с.
12. Мельников Ю.П., Попов С.В. Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местоопределения источников излучения. Москва : Радиотехника, 2008. 432 с.
13. R&S@DDF1GTX High-Speed Scanning HF Direction Finder. URL: <https://www.rohde-schwarz.com/ua/product/ddf1gtx->

productstartpage_63493-148040.html.

14. Автоматический обнаружитель-пеленгатор сигналов HF диапазона частот «Восток-ОПК». URL: <http://www.ntcrts.com/assets/восток-опк3.pdf>.

REFERENCES

1. Saibel, A.H. (1953), *Osnovy teorii tochnosti radiotekhnicheskikh metodov mestoopredeleniya* [Fundamentals of the theory of precision radio positioning methods], State publishing house oboronprom, Moscow, 53 p.
2. Shirman, Ya.D. and Manzhos, V.N. (1981), *Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokacionnoj informacii na fone pomekh* [Theory and technique of processing radar information on interference background], Radio and communication, Moscow, 416 p.
3. Don, J. Torrieri. (1984), "Statistical Theory of Passive Location Systems", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-20, no. 2, pp. 183–198.
4. Chernyak, V.S. (1993), *Mnogopozitsionnaya radiolokaciya* [Multi-position radar], Radio and communication, Moscow, 416 p.
5. Kukes, I.S. (1964), *Osnovy radiopelengacii* [Fundamentals of radio direction finding], Soviet radio, Moscow, 640 p.
6. Ankit, Jain (2019), *Detection on HF radio transmitters using passive geolocation techniques*, available to: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02133926>.
7. (2019), *Introduction into Theory of Direction Finding*, available to: https://cdn.rohde-schwarz.com/us/campaigns_2/a_d/Introduction-Into-Theory-of-Direction-Finding.pdf.
8. Rembovskiy, A.M., Ashykhmy, A.V. and Kozjmy, V.A. (2010), *Radyomonytoryng – zadachy, metody, sredstva* [Radio monitoring - tasks, methods, tools], Hotline Telecom, Moscow, 624 p.
9. Stepanov, N.N. (1948), *Sfericheskaya trigonometriya* [Spherical trigonometry], OGIZ, Moscow, 155 p.
10. Doluhanov, M.P. (1972), *Rasprostraneniye radiovoln* [Radio waves propagation], Svyaz, Moscow, 336 p.
11. Melnykov, Ju.P. (2005), *Vozdushnaya radyotekhnicheskaya razvedka (metody ocenki effektivnosti)* [Aerial radio technical intelligence (methods of assessing effectiveness)], Radio engineering, Moscow, 304 p.
12. Melnykov, Ju.P. and Popov, S.V. (2008), *Radiotekhnicheskaya razvedka. Metody ocenki effektivnosti mestoopredeleniya istochnikov izlucheniya* [Electronic intelligence. Evaluation methods efficiency positioning the radiation sources], Radio engineering, Moscow, 432 p.
13. R&S®DDF1GTX High-Speed Scanning HF Direction Finder, available to: https://www.rohde-schwarz.com/ua/product/ddf1gtx-productstartpage_63493-148040.html.
14. Avtomaticheskij obnaruzhitel'-pelengator signalov HF diapazona chastot «Vostok-OPK» [Automatic Direction Finder detector-signal HF band "Vostok-OPK"], available to: http://www.rtv-pvo-gsvg.narod.ru/doc/Prv_13.pdf.

Received (Надійшла) 18.11.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 03.02.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

- Кобзев Анатолій Васильович** – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Anatolij Kobzev – Doctor of Technical Sciences, Professor, PSenior Research Associate Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: tobzev@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3604-7770>.
- Мурзін Михайло Вячеславович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Mykhailo Murzin – Candidate of Technical Sciences, Professor, Research Associate Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: mikhailmwork@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5093-0551>.

**Показатели точности определения координат источников радионизлучения
в пеленгаторной сети HF диапазона**

А. В. Кобзев, М. В. Мурзин

Аннотация. Проводится оценка предельных возможностей по точности определения координат источников радионизлучения (ИРИ) в пеленгаторной сети HF диапазона при размещении ее на территории Украины. Выводятся расчетные соотношения для вычисления рабочих зон определения координат ИРИ и обсуждаются результаты расчетов при минимально возможном числе пеленгаторов сети (3,4), обеспечивающих круговой контроль пространства. Результаты расчетов рабочих зон отражают предельные возможности по точности определения координат, поскольку характеристики сети (пространственный разнос пеленгаторов и реальная точность пеленгации) выбраны предельно возможными.

Ключевые слова: пеленгаторная сеть; граничные возможности по точности; координаты источников радионизлучения; размещение пеленгаторов; контроль радионизлучений.

Indicators of accuracy for determining the coordinates of radio emission sources

in the short wave direction finding network

Anatolij Kobziev, Mykhailo Murzin

Abstract. Direction finding networks have found application in radio monitoring, radio intelligence and passive radar systems. The operation of the direction-finding network in the short-wave range has a number of distinctive features, namely, long range of direction finders (up to several thousand km) due to ionospheric propagation of radio waves and high sensitivity of narrow-band signal receivers. In addition, the distance between direction finders can be hundreds or thousands of kilometers. Therefore the calculations should be carried out due to the location of the direction finders and radio sources on a spherical surface. In this work, analytical relationships are obtained for calculating the accuracy indicators of the estimation of coordinate information (latitude and longitude) at the output of the direction finding network in a rather general form in relation to the features of the short-wave range. The problem is solved in a geographic coordinate system for an arbitrary number of direction finders (two at least) and with their arbitrary location on the surface of Earth. To carry out a comparative analysis and assess the quality of coordinate information for various options for placing direction finders, it is proposed to display accuracy indicators using working zones (for example, round). The use of working areas allows a visual assessment on the map overall spatial pattern for accuracy indicators direction-finding network. The results of the calculation of working areas direction-finding network shortwave when placing it on the territory of Ukraine in the case of the smallest real errors direction-finding, and a mutual separation distance finders maximum permissible selected. The calculation results reflect the limiting possibilities for the accuracy of determining the coordinates of radio emission sources for such a direction finding network with a minimum number of direction finders (3 or 4). The given method of calculating working zones allows for the implementation of the best accuracy indicators to choose a specific option for placing direction finders on the territory of the country, taking into account the influence of all factors (approach of positions, availability of access roads, conditions for accommodating service personnel, etc.). As an example, the work considers 3 options for the location of direction finders with the maximum separation on the territory of Ukraine. The developed technique can also be used for other passive radar systems with direction finding coordinates, when it is necessary to take into account the spherical form of the Earth. Such a system can include two or more aerial reconnaissance aircraft with direction finders on board, as well as one aircraft or unmanned vehicle that determines coordinates by the method of multiple direction finding on the flight route.

Keywords: direction finding network; boundary possible accuracy; coordinates of radio emission sources; placement of direction finders; radio emission control.

Andrii Kovalchuk¹, Mykola Oleshchuk², Volodymyr Karlov¹, Oleh Karpenko¹,
Oksana Biesova¹, Olena Lukashuk¹

¹ Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

² Military unit A2533, Dnipro, Ukraine

ANALYSIS OF SENSITIVITY OF TARGET TRACKING SYSTEMS TO EXTERNAL INTERFERENCE IN MULTICHANNEL RADARS WITH FIXED PARAMETERS

Abstract. The multichannel and fixed parameters radars for tracking targets with the phased array antennas are widely used in modern military surveillance systems. The modular integration of a phased antenna array with digital processors allows to realize the command and control functions of antenna patterns for tracking multiple targets in the time resolution modes. Tracking of the air targets in range, radial speed and angular coordinates of evaluations and azimuth is provided by means of the multichannel radars without adaptation modes to the characteristics of external influences. Thus, adjusting the algorithms of tracking systems to the maximum maneuverability of the air targets can lead to a significant reduction in the accuracy of surveillance in comparison with the potentially achievable accuracy for such radars of tracking the linear flight targets in the long duration of time. In the case of adjusting the algorithms of tracking systems to either low intensity of flying targets, or lack of the aircraft maneuvering, it is possible to significantly increase the error of the aircraft flying information, and as a result to have a disruption of tracking the air targets. The increase in the parameters of the tracking error in relation to the influence of external interference were obtained as a result of the study. As a result of research, it is possible to assess the feasibility of adapting to certain characteristics of external influences, and provide recommendations for selecting and fixing the parameters of algorithms of tracking systems to ensure their versatility to surveillance targets with both high maneuverability, and implementing the stealth technology.

Keywords: automatic tracking system; extrapolation error variance; range; radar with fixed parameters.

Introduction

The problem of achieving sustainable tracking of maneuverable targets is a tackle in complex and expensive adaptive radar systems for tracking the air targets. Analysis of possible errors in tracking accuracy under the influence of external interference in radars with fixed parameters is presented in the article. In practice, it often happens that the regulation of the parameters of the tracking system does not meet the requirement of stable tracking of targets when exposed to external interference, which is considered in the article.

This publication analyzes possible losses in tracking accuracy in systems with fixed parameters, if the settings of the algorithms of tracking systems do not match the characteristics of external interference. The influence of parameters of the target movement stochastic models with both exponentially correlated values of targets acceleration, and observations on potential accuracy of radio tracking system by range is investigated. and also in case of fixing of parameters dependences of relative increase of tracking error are received.

It is known that the synthesis of the tracking systems is based on the model of both target movement characteristics, and the measurements of corresponding flight coordinates.

Therefore, it is quite natural that the closer these models are to real practical conditions, the higher the accuracy of the tracking systems.

However, the characteristics of external influences change in the real condition, and therefore it is necessary to find out, the change in characteristics affects the potential accuracy of the optimal system. If the system parameters of radars do not meet the

characteristics of the external influences, the radars will determine the decrease in the accuracy of tracking the air targets.

The obtained results make it possible to evaluate the feasibility of designing the tracking systems that are adaptable to certain characteristics of external influences.

If adaptation is impractical, it allows you to select fixed values of the parameters of the radar at which the system best meets its purpose.

Thus, the analysis of the sensitivity of the targets tracking systems under the influence of external interference in the multichannel radars with fixed parameters is presented in the article.

Research and publications analysis. The potential effectiveness of the airspace surveillance depends on the accuracy of tracking air targets by means of radars. The main parameters of the radar include sensitivity of the receiver devices, the signal-to-noise ratio and the discriminator characteristics [1-3].

Adjusting the parameters of the tracking algorithm to the worst conditions, for example, the signal-to-noise ratio is minimal, maneuverability is maximum, leads to a relative deterioration in the accuracy of tracking the air targets to compare with the optimal setting of the characteristics to the best conditions of surveillance, for example, when the signal-to-noise ratio is very high and the targets fly at the strait path without maneuvering.

The choice of parameters of the air targets tracking algorithm for the radars with fixed parameters design for the best conditions.

If the influence of external interference increases, it will lead to a deterioration in the accuracy of tracking targets by a radar with fixed parameters.

Thus, the correct choice of characteristics of the target's maneuverable flight model and the tracking

model matched with it, is essential for choosing the parameters of the radar operation algorithm [3-6].

The purpose of the article is to analyze the sensitivity of the receiving module of the tracking system to the choice of the parameters of the model of the target's maneuverable flight of the to the surveillance modes of the multichannel radars with fixed parameters under the influence of the external interference. The estimation of possible decrease in sensitivity in case of mismatch of the radar parameters with the characteristics of external interference is carried out.

Research results

Let us consider a model in which the maneuverable flight of aircraft is described by a stochastic mathematical model with exponentially correlated components of the target acceleration vectors. The target acceleration vectors are used to describe the motion of a maneuvering target along the tracked coordinates [1].

$$\bar{x}(t_n + T_n) = \Phi(T_n)\bar{x}(t_n) + B\xi(t_n), \quad (1)$$

where $\bar{x}(t_n) = (x(t_n), \dot{x}(t_n), \ddot{x}(t_n))^T$ – the state vector, the components of which are the coordinate of the target, its first and second derivatives;

$$\hat{O}(T_n) = \begin{pmatrix} 1 & \dot{O}_n & T_n^2/2 \\ 0 & 1 & \dot{O}_n \\ 0 & 0 & \rho \end{pmatrix} - \quad (2)$$

the transition state matrix;

$$B = (0 \quad 0 \quad 1)^T - \quad (3)$$

the excitation matrix;

T_n – the observation time interval;

$\xi(t_n)$ – discrete sequence of white excitation noise with variance, which is described by the expression:

$$v_{\xi}(T_n) = \sigma_i^2 (1 - \rho^2); \quad (4)$$

$$\rho = e^{-T_n/T_i} - \quad (5)$$

parameters describing the correlation of the components of the target acceleration vector in the observation interval;

T_i – the time constant of the correlation of the components of the targets acceleration vector;

σ_i – the standard deviation of the values of the components of the targets acceleration vector.

As shown in [1], with the small interval of observations ($T_n < 1$ s) the matrix element ϕ_{13} of the matrix $\Phi(T_n)$ can be taken equal to zero:

$$\hat{O}(T_n) = \begin{pmatrix} 1 & \dot{O}_n & 0 \\ 0 & 1 & \dot{O}_n \\ 0 & 0 & \rho \end{pmatrix}. \quad (6)$$

In the synthesis of linear systems, the model of observations is represented by the following equation

$$y(t_n) = H\bar{x}(t_n) + f(t_n), \quad (7)$$

where $H = (100)$ – matrix of observations; $f(t_n)$ – discrete white sequence of observation noise with zero mean and variance $v_f(t_n)$.

In these models, the parameters to be fixed are: ϵ , σ_i , T_i , v_f . There are two parameters determined by the maneuverability of the monitored targets, and the latter is determined by the value of the signal-to-noise ratio and the characteristics of the discriminator.

In addition, when the target's observation is organized within the criterion of the sufficient accuracy [8], the variable parameter may be the interval of observations T_n . As you known [2], the automated tracking system should be optimized by the criterion of the standard error minimum. The automated tracking system may be described by the recurrent relations:

$$\hat{\bar{x}}(t_n) = \hat{\bar{x}}_y(t_n) + K(t_n)[y(t_n) - H\hat{\bar{x}}_y(t_n)]; \quad (8)$$

$$\hat{\bar{x}}_y(t_n + T_n) = \Phi(T_n)\hat{\bar{x}}(t_n); \quad (9)$$

where $K(t_n)$ – the matrix of gain factors which is caused by expressions:

$$K(t_n) = V_e(t_n)H[HV_y(t_n)H^T + v_f(t_n)]^{-1}, \quad (10)$$

$$V(t_n) = V_e(t_n) - V_e(t_n)H^T \times \\ \times [HV_a(t_n)H^T + v_f(t_n)]^{-1}HV_e(t_n), \quad (11)$$

$$V_e(t_n + T_n) = \Phi(T_n)V(t_n)\Phi^T(T_n) + Bv_{\xi}(T_n)B^T, \quad (12)$$

in which $V(t_n)$, $V_e(t_n + T_n)$ – matrices of the central moments of errors estimation and extrapolation accordingly. Let the proposed flight models of targets and models of the tracking radars are reflected the real conditions of the air observation. Then the variance of the tracking error σ_e^2 is equal to the element v_{y11} of the matrix $V_e(t_n)$.

With constant characteristics of external influences, calculations of the variance of the tracking error in the steady modes can be performed by multiple solutions of recurrent equations (11), (12).

The results of the solution for the range of the automated tracking system are shown in Fig. 1. As can be seen from the obtained graphs, the variance of the extrapolation error of the range depends significantly on the variance of the observation noise, weaker than the variance of the values of the acceleration of the target, and slightly depends from the constant maneuvering T_m . Therefore, to ensure stable and stable tracking of the maneuvering target, it is necessary to ensure the maximum value of the signal-to-noise ratio and the sensitivity of the receiving path and the discriminator [7-12]. In the case when for the synthesis of the surveillance system the parameters of models (1), (7) are fixed and equal respectively to σ_i^* , T_i^* , v_f^* , its accuracy may be below the potentially achievable: $\sigma_y^2 \geq v_{y11}$.

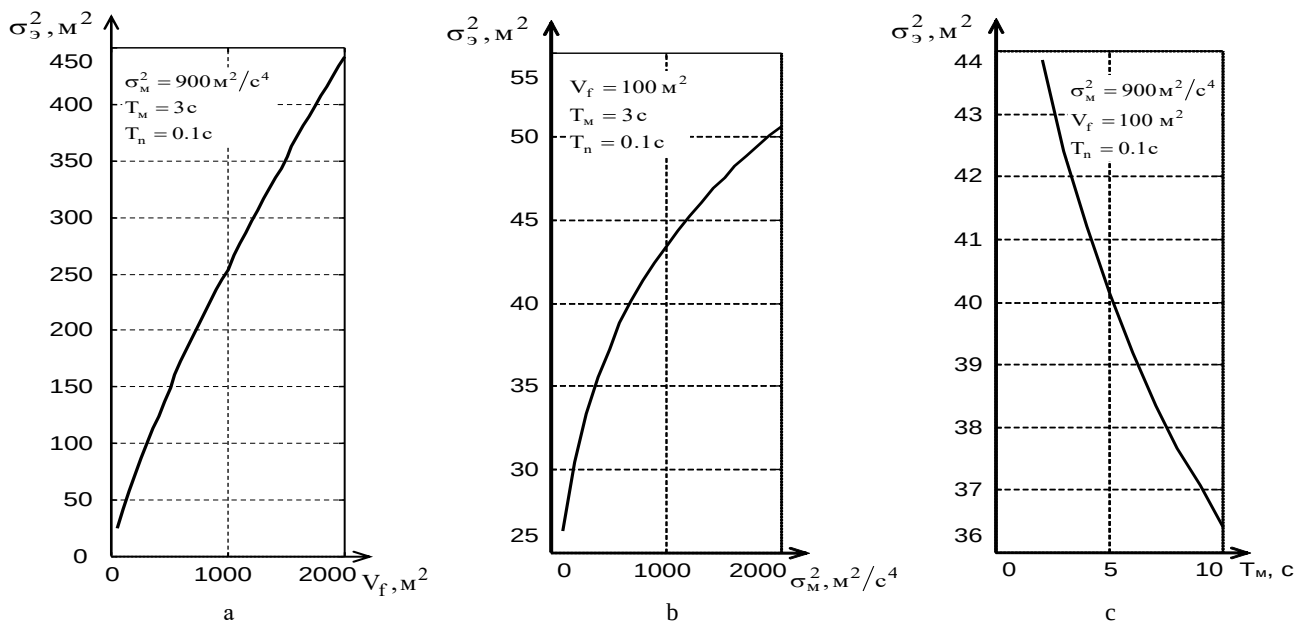


Fig. 1. Dependence of the variance:

- a – of the distance extrapolation error on the variance of the observation noise;
- b – of the error on the variance of the values of the acceleration of the target;
- c – of the distance extrapolation error on the time correlation constant of the target acceleration values

It can be calculated in the general case only by statistical tests. For the steady mode there is an analytical solution, which is found by the spectral method [2, 3].

The expressions obtained with the help of this technique for variances of dynamic and fluctuation tracking errors are rather cumbersome and therefore are not given here.

In Fig. 2 graphs of the relative deterioration of the target tracking error of the radar with fixed parameters, which are relative to the optimal, are given:

$$\Delta\sigma_e^2, \% = (\sigma_e^2 - V_{ell}) / V_{ell} \cdot 100\%, \quad (12)$$

In the Fig. 2 the solid lines are corresponding to the parameters recorded for the maximum, the dashed lines are corresponding to the parameters, recorded for the minimum, of the relative deterioration of the variance functions.

The choice of target tracking parameters in the middle of the range of the proposed parameters allows to achieve stable target tracking by radars in the conditions of interference.

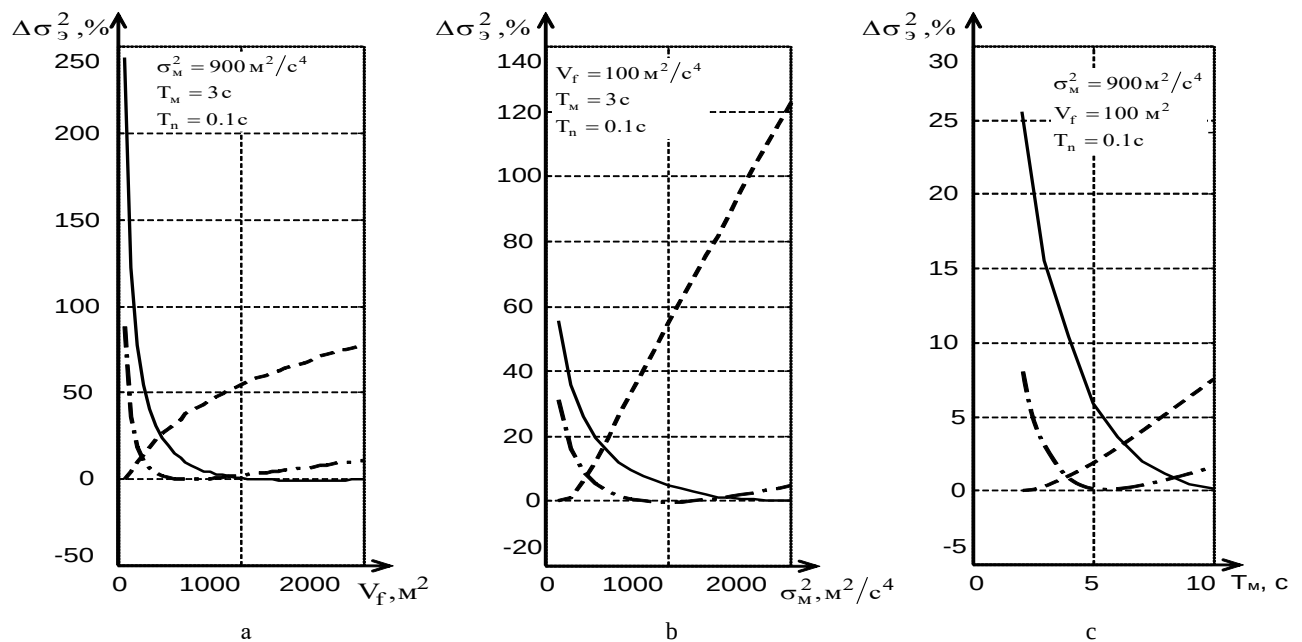


Fig. 2. Relative deterioration:

- a – of the variance of the extrapolation error of the distance from the variance of the observation noise;
- b – of variance extrapolation error of range from the variance of values of targets acceleration;
- c – of variance of extrapolation error of distance from the time of the values of the targets acceleration

Also, fixing the value of the variance of the noise of the target tracking v_f , and the variance of the values of the maneuvering acceleration of the targets σ_i^2 in the area of the average values: up to 7% – according to the parameter T_m allows to achieve stable target tracking. Thus, stable tracking of maneuvering targets is achieved either by selecting the parameters defined in the article in the middle of the dispersion area or by using adaptive target tracking radars [4, 6].

Conclusions

1. As follows from the analysis of the results, the choice of parameters of the target tracking radars based on the criterion of achieving a minimum error in the most difficult conditions, leads to losses of achievable accuracy in unfavorable tracking conditions (Fig. 2):

up to 2.5 times are according to the parameter of the dispersion of the tracking noise;

up to 60% are according by parameter the dispersion value of acceleration rate σ_m^2 .

2. The parameters variance in the most friendly conditions of surveillance (v_f^* and σ_i^{2*} – minimum, T_m^* – maximum), lead to the fact that in unfriendly condition of surveillance, the error may be worse than the potentially achievable (Fig. 2) up to 80% – by the parameter v_f ; up to 120% – by parameter σ_m^2 ; up to 25% – according to the parameter T_m , which can increase the probability of failure of the maneuvering target by radars with fixed parameters in conditions of external interference.

3. Based on practical experience, it is shown, that the sensitivity of the targets range tracking module of the radar weakly depends on the targets acceleration parameter T_i . Therefore, the regulation in the area of characteristics of the receiving system proposed in the article, which increasing the sensitivity and the signal-to-noise ratio of receiving module, allows to develop effective radars with fixed parameters for stable targets tracking in external interference.

REFERENCES

1. Singer, R.A. (1971), "Evaluation of the characteristics of the optimal filter for tracking a piloted target", *Foreign radio electronics*, No. 8, pp. 40–57.
2. Sage, E. and Mels, J. (1976), *The theory of evaluation and its application in communication and management*, Svyaz, 496 p.
3. Alekseychev, D.D. and Kazakov, A.A. (1979), *Automatic control and regulation of radio engineering systems. Part 3. Optimization of automatic control systems*, VIRTА PVO, Kharkiv, 149 p.
4. Kovalchuk A.A. (2010), "Improving the stability of tracking maneuvering targets at radial speed using an adaptive parallel filtration algorithm", *Zbirnik naukovikh prats HUPS*, Issue 1(23), HUPS, Kharkiv, pp. 55–58.
5. Khismatulin V.S., Sachuk I.I. and Kovalchuk A.A. (2000), "Organization of observation of an aerodynamic target with sufficient accuracy", *Bulletin of Kharkiv State Polytechnic University*, Issue 125, KHSPU, Kharkiv, pp. 13–17.
6. Shirman Y.D. (2007), *Radio electronic systems. Bases of construction and theory. Reference book*, Moscow, 512 p.
7. Kovalenko, A. and Kuchuk, H. (2018), "Methods for synthesis of informational and technical structures of critical application object's control system", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 22–27, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>.
8. Sviridov, A., Kovalenko, A. and Kuchuk, H. (2018), "The pass-through capacity redevelopment method of net critical section based on improvement ON/OFF models of traffic", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 2, pp. 139–144, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>.
9. Kuchuk G.A., Mohammad A.S. and Kovalenko, A.A. (2011), "Method for reducing data transmission time in a wireless network", *Control, navigation and communication systems*, No. 3 (19), pp. 209–213.
10. Nechausov A., Mamusuc I. and Kuchuk N. (2017), "Synthesis of the air pollution level control system on the basis of hyperconvergent infrastructures", *Advanced Information Systems*, Vol. 1, No. 2, pp. 21–26. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.04>.
11. Karlov V.D., Kucher D.B., Strutsinskiy O.V. and Lukashuk O.V. (2016), "On the issue of measuring the range of low-altitude target during its radiolocation within the tropospheric waveguide over the sea", *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 3 (24), pp. 98–101.

Received (Надійшла) 15.12.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.02.2021

Ковальчук Андрій Олексійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри фізики та радіоелектроніки, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Andrii Kovalchuk – Candidate of Technical Sciences, Senior Research, Associate Professor of Physics and Radio Electronics Department; Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: lnna700nf@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1269-9368>.

Олещук Микола Миколайович – офіцер, військова частина А2533, Дніпро, Україна;

Mykola Oleshchuk – officer, Military unit A2533, Dnipro, Ukraine;

e-mail: oleshuk@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9737-6896>.

Карлов Володимир Дмитрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізики та радіоелектроніки Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Volodymyr Karlov – Doctor of Technical Sciences Professor Head of Physics and Radio Electronics Department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Karlov@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1043-684X>.

Карпенко Олег Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізики та радіоелектроніки Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Oleh Karpenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Physics and Radio Electronics Department; Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: karoleh69@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4009-1990>.

Бесова Оксана Василівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник наукового центру Повітряних Сил, Харківський національний університет Повітряних Сил, Харків, Україна;

Oksana Biesova – Candidate of Technical Sciences, Senior Research of the Air Force Scientific Center, Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: bytko75@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7744-1339>.

Лукашук Олена Вячеславівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики та радіоелектроніки, Харківський національний університет Повітряних Сил, Харків, Україна;

Olena Lukashuk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Physics and Radio Electronics Department, Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: dlyavac@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8721-2433>.

Аналіз чутливості систем супроводження цілей з фіксованими параметрами багатоканальної РЛС до характеристик зовнішніх впливів

А. О. Ковальчук, М. М. Олещук, В. Д. Карлов, О. В. Карпенко, О. В. Бесова, О. В. Лукашук

Анотація. У сучасних радіотехнічних системах військового призначення широко застосовуються багатоканальні радіолокаційні станції (РЛС) супроводження цілей з фазованою антенною решіткою (ФАР). Використання ФАР у комбінації з цифровою обчислювальною технікою дозволяє керувати діаграмою спрямованості РЛС і супроводжувати декілька цілей в режимі розподілу часу. Супроводження повітряних цілей в багатоканальній РЛС забезпечується підсистемами за дальністю, радіальною швидкістю та кутовими координатами, в більшості випадків без адаптації до характеристик зовнішніх впливів. Так, налаштування алгоритмів слідкуючих систем на максимальні маневрені можливості повітряних цілей можуть призводити до суттєвого зниження точності супроводження відносно потенційно досяжного на ділянці відсутності маневрування, яка буває досить тривалою. У разі налаштування алгоритмів слідкуючих систем на низьку інтенсивність, або відсутність маневрування, можливе надто суттєве зростання помилки на ділянці здійснення маневру з максимальними можливостями літального апарату. Дане питання досить ефективно вирішується в адаптивних слідкуючих системах. У даній публікації проведено аналіз можливих втрат в точності слідкування в системах з фіксованими параметрами, у разі коли налаштування параметрів алгоритмів слідкуючих систем не співпадають з характеристиками зовнішніх впливів відносно потенційно можливих. Досліджено вплив параметрів стохастичної моделі руху цілі з експоненційно корельованими значеннями прискорення цілі та моделі спостережень на потенційну точність радіотехнічної слідкуючої системи за дальністю, а також у разі фіксації параметрів отримані залежності відносного збільшення помилки супроводження. У результаті проведених досліджень, з'являється можливість оцінки доцільності адаптації до певних характеристик зовнішніх впливів, та надання рекомендацій щодо вибору і фіксації параметрів алгоритмів слідкуючих систем для забезпечення їх універсальності застосування до супроводження цілей з постійно зростаючими маневреними можливостями та малою помітністю.

Ключові слова: система автоматичного супроводження; дисперсія похибки екстраполяції; дальність; фіксовані параметри.

Анализ чувствительности систем сопровождения целей с фиксированными параметрами многоканальной РЛС к характеристикам внешних воздействий

А. А. Ковальчук, Н. Н. Олещук, В. Д. Карлов, О. В. Карпенко, О. В. Бесова, Е. В. Лукашук

Аннотация. В современных радиотехнических системах военного назначения широко применяются многоканальные радиолокационные станции (РЛС) сопровождения целей с фазированной антенной решеткой (ФАР). Использование ФАР в сочетании с цифровой вычислительной техникой позволяет управлять диаграммой направленности РЛС и сопровождать несколько целей в режиме разделения времени. Сопровождение воздушных целей в многоканальной РЛС обеспечивается подсистемами по дальности, радиальной скорости и угловым координатам, в большинстве случаев без адаптации к характеристикам внешних воздействий. Так, настройки алгоритмов следящих систем на максимальные маневренные возможности воздушных целей могут приводить к существенному снижению точности сопровождения относительно потенциально достижимого на участке отсутствия маневрирования, которая бывает достаточно длительной. В случае настройки алгоритмов следящих систем на низкую интенсивность, или отсутствие маневрирования, возможно слишком существенный рост ошибки на участке осуществления маневра с максимальными возможностями летательного аппарата. Данный вопрос достаточно эффективно решается в адаптивных следящих системах. В данной публикации проведен анализ возможных потерь в точности слежения в системах с фиксированными параметрами, в случае если настройки параметров алгоритмов следящих систем не совпадают с характеристиками внешних воздействий относительно возможных. Исследовано влияние параметров стохастической модели движения цели с экспоненциально коррелированными значениями ускорения цели и модели наблюдений потенциальную точность радиотехнической следящей системы по дальности, а также в случае фиксации параметров, полученные зависимости относительного увеличения ошибки сопровождения. В результате проведенных исследований, появляется возможность оценки целесообразности адаптации к определенным характеристикам внешних воздействий, и рекомендации по выбору и фиксации параметров алгоритмов следящих систем для обеспечения их универсальности применения к сопровождению целей с постоянно растущими маневренными возможностями и малой заметностью.

Ключевые слова: система автоматического сопровождения; дисперсия погрешности экстраполяции; дальность; фиксированные параметры.

Serhii Semenov, Viacheslav Davydov, Daryna Hrebeniuk

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

RESEARCH OF THE SOFTWARE SECURITY MODEL AND REQUIREMENTS

Abstract. The **subject** of research in the article is a software security model. The **aim** of the work is to research the quality characteristics of the software and requirements for the software security in order to improve their safety. The article solves the following **tasks**: researching the shortcomings of the existing security model in order to identify its main shortcomings; study of the quality characteristics of software that affect its security in order to identify the possibility of improving the quality of software. The following **results** were obtained: on the basis of the analysis of the existing model of software security, the main features of the attributes of this model were identified, their advantages and disadvantages were given. On the basis of the conducted analytical study, the necessity of improving the existing model of ensuring the security of software has been proved. Existing requirements for software and characteristics that affect its quality are considered. The characteristics of software security are highlighted, the indicators of which should be improved. **Conclusions:** a software security model has been studied. The need to develop this model is shown by introducing the possibility of adapting the existing requirements for the security of software tools throughout the entire life cycle of software development; the study of the quality characteristics of software showed that to ensure its security, it is necessary to improve the following characteristics: integrity, authentication, confidentiality, access control. However, it was shown that an increase in these characteristics can lead to a deterioration in other indicators of software quality: portability, maintainability, performance.

Keywords: software security; software lifecycle; cybercrime.

Introduction

In today's world of ubiquitous computerization, the creation of secure computer systems is getting an increasing role. This is due to the fact that with the development of information technology, the qualitative and quantitative characteristics of malicious influences associated with information technology and computer systems, in particular, cyberattacks, are increasing. Losses from cybercrime reach 100 billion dollars a year worldwide, and millions of dollars a year in Ukraine. Thus, cybercrime was among the five most widespread economic crimes in the world, and in Ukraine, in particular [1, 2]. Comparison of losses from cybercrime on the same resource for previous years [2, 3] showed a tendency for its increase.

Analysis of recent research and publications.

An integral part of existing computer systems is software. Studies [4-9] have shown that in terms of security, software is one of the most vulnerable components of computer systems. This is due to a number of factors of an objective and subjective nature (high cost of losses and, as a consequence, increased interest of attackers, shortcomings of modern tools and software development platforms, insufficient competence of user personnel, etc.).

However, in accordance with international and Ukrainian legislation, the requirements for the security of software are among the highest priority in the system of their qualitative assessment. For example, according to the Law of Ukraine "About Copyright" [10], software is intellectual property and requires protection from piracy, plagiarism, counterfeiting of various kinds, illegal distribution and other illegal actions and interventions.

The aim of the article. Thus, the problem of increasing the security of software becomes urgent. The purpose of the work is:

- study of the software security model in order to identify the main shortcomings of the model, as well as identify ways to eliminate them;

- study of the quality characteristics of software that affect its security in order to identify opportunities to improve the quality of software.

Materials and methods

A generalized model of software security assurance is shown in Fig. 1.

The main components of this model include:

- regulatory documents (e.g. ISO standards) regulating the process of ensuring safety. These safety requirements are strict and mandatory. This, in turn, imposes restrictions related to the relevance of these documents. So, many regulatory documents, in particular the Law "On Copyright", have the latest amendments dated 2016.

- Thus, these documents lose their relevance and require correction.

- the software itself;
- methods and means of ensuring safety;
- threats to security services - a potential event, action, process or phenomenon that can harm the software product and the company that produces the software product. They affect the software lifecycle;

- software life cycle - a set of requirements, software development and testing methodologies that define the processes, activities and tasks that are used in the delivery, development, testing, application, maintenance and termination of the use of software products.

As it shown at Fig. 1, one of the important attributes of the presented model is safety requirements. They are regulated by standards and development lifecycle. The development of technologies, development methodologies requires adjustment (adaptation) of the existing requirements for the security of software tools

throughout the life cycle of software development. Unfortunately, the developers of standards and specifications do not pay enough attention to this issue at the moment.

This is largely due to the lack of access to the confidential information required for this by private companies (the number of companies that release software products is too large for all their recommendations to be taken into account; a number of requirements of some companies may contradict the requirements of other companies, which may be due to the difference financial support and target audience; etc.), and possible dynamic changes in the software life cycle.

In Fig. 2 describes the life cycle of the software product. It should be noted that the main results of the software requirements analysis process are:

- determination of requirements for software elements of the system and their interfaces;

- analysis of requirements for software for correctness and testability;
- analysis of the impact of software requirements on the operating environment;
- identifying compatibility and traceability between software requirements and system requirements;
- determination of priorities for the implementation of requirements for software;
- assessing changes in software requirements in terms of cost, work schedules and technical impacts.

Fig. 2 shows that the results of the analysis of software requirements significantly affect decision making, design architecture, software development and testing. At the same time, the requirements at each stage are adapted taking into account the identification of the specifics of the software, development methodologies, development tools (e.g., frameworks, design patterns, development environment) and other factors.

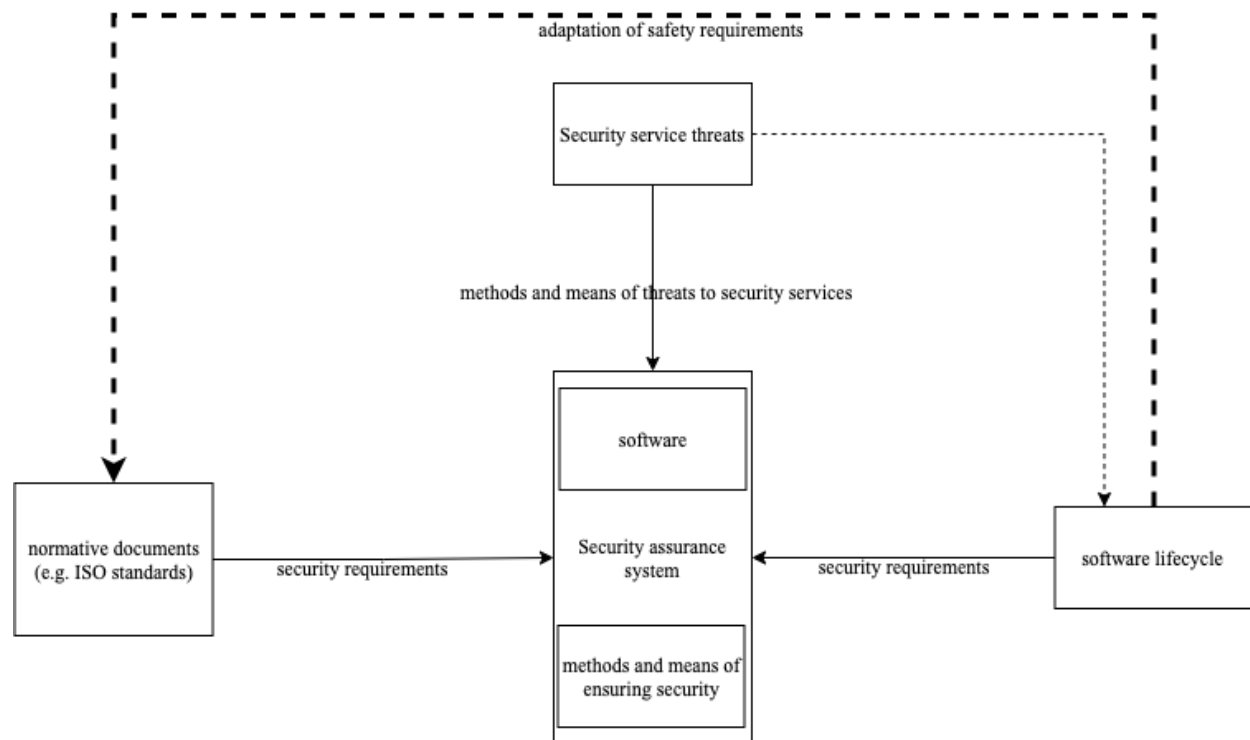


Fig. 1. Generalized software security model

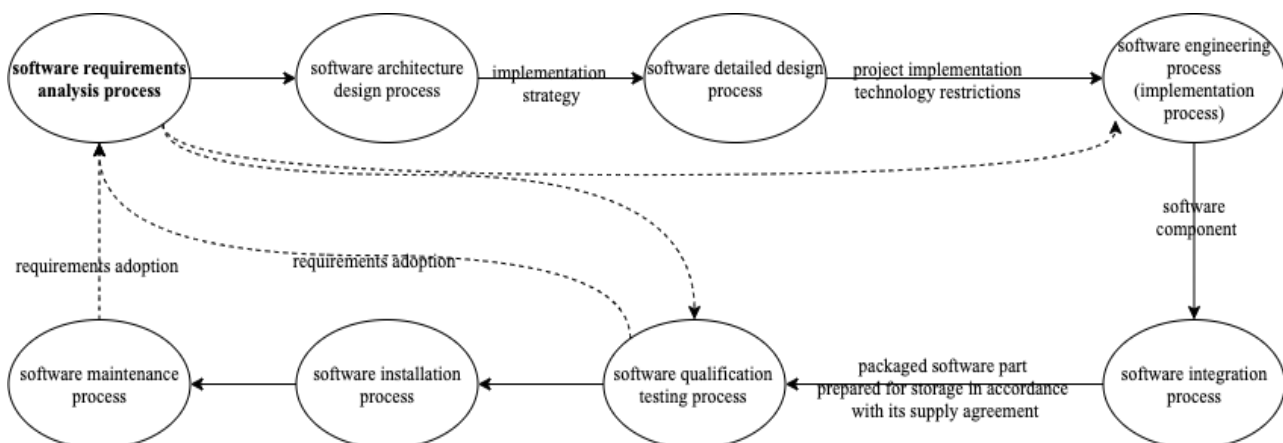


Fig. 2. Schematic description of the software lifecycle

It should also be noted that it is in the testing and maintenance processes of software that requirements adaptation should take place. Analysis of the standards ISO 29148 [11], ISO 9126 [12], ISO/IEC 25010 [13], Fig. 3) and others [14-16] made it possible to classify the requirements for a software product. Schematically, these requirements can be presented in the form of Fig. 4. So, there are 3 main groups of requirements:

- system requirements determine the external conditions for the implementation of system functions and restrictions on the creation of a product, as well as requirements for the description of software and hardware subsystems. System requirements impose restrictions on the architecture of the system, the means of its visual presentation and functioning;

- functional requirements are a list of functions or services that the system must provide, as well as restrictions on data and behavior of the system during its execution;

- non-functional requirements determine the conditions for performing functions (for example, protecting information in a database, authenticating access to software, etc.) in an environment that are not

directly related to functions, but reflect the needs of users to perform them. These requirements characterize the principles of interaction with environments or other systems, and also determine the indicators of uptime, data protection and quality achievement, taking into account the recommendations of the standard used.

At the same time, the studies carried out have shown that the practical implementation of the assigned tasks of increasing security can lead to a deterioration in other indicators of software quality, for example, such as:

- portability. The introduction of additional means of protection may entail the use of architecture-specific structures, the analogues of which may not be found for the rest;

- productivity. Protection mechanisms of a software product, such as obfuscation and encryption, affect performance and require additional processor resources to perform operations;

- maintainability. For example, turning off the debug information necessary to increase software confidentiality leads to a deterioration in analyzability, in particular, when the stack is received, a call in case of errors occurs.

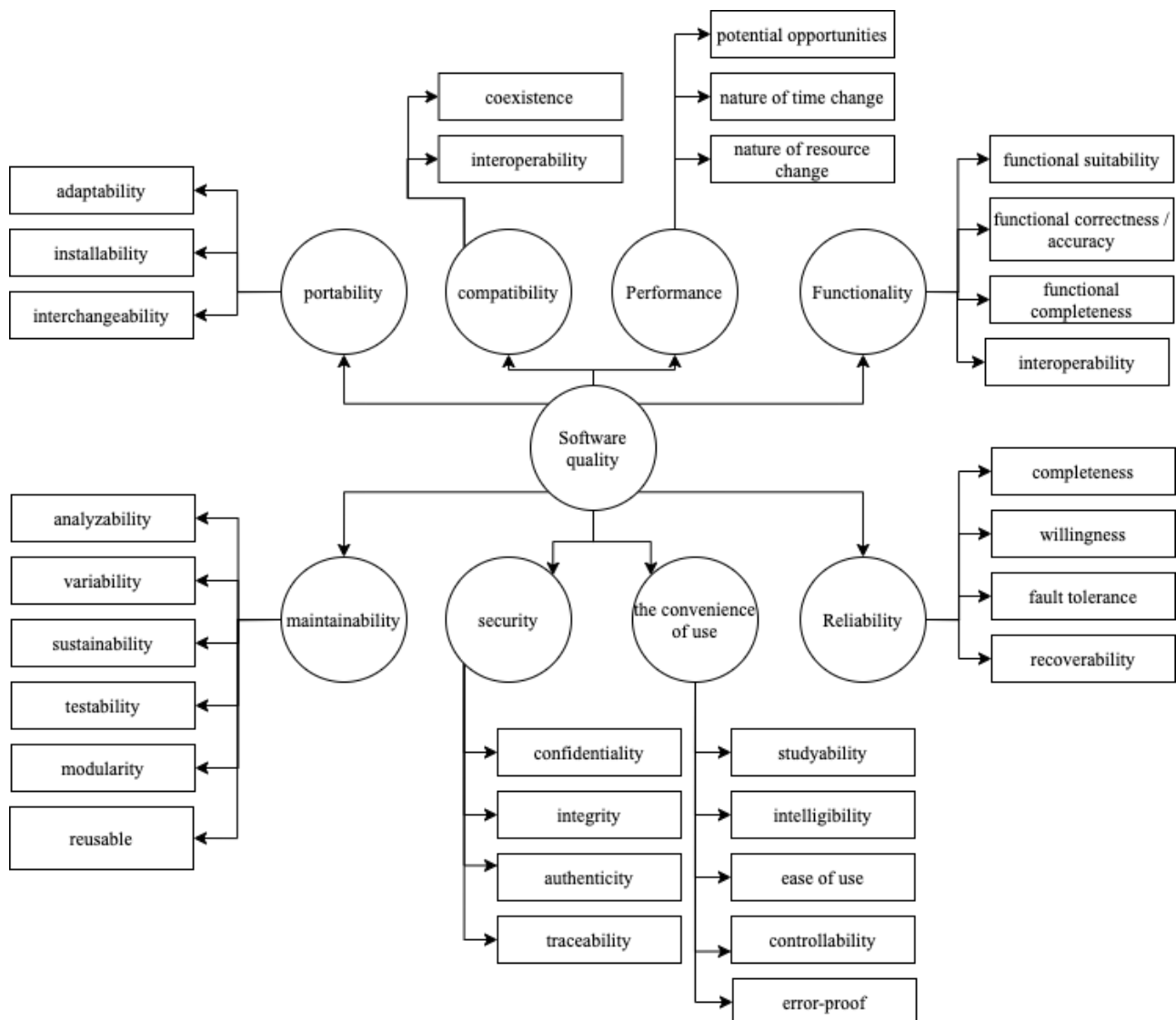


Fig. 3. ISO / IEC 25010 software quality classification

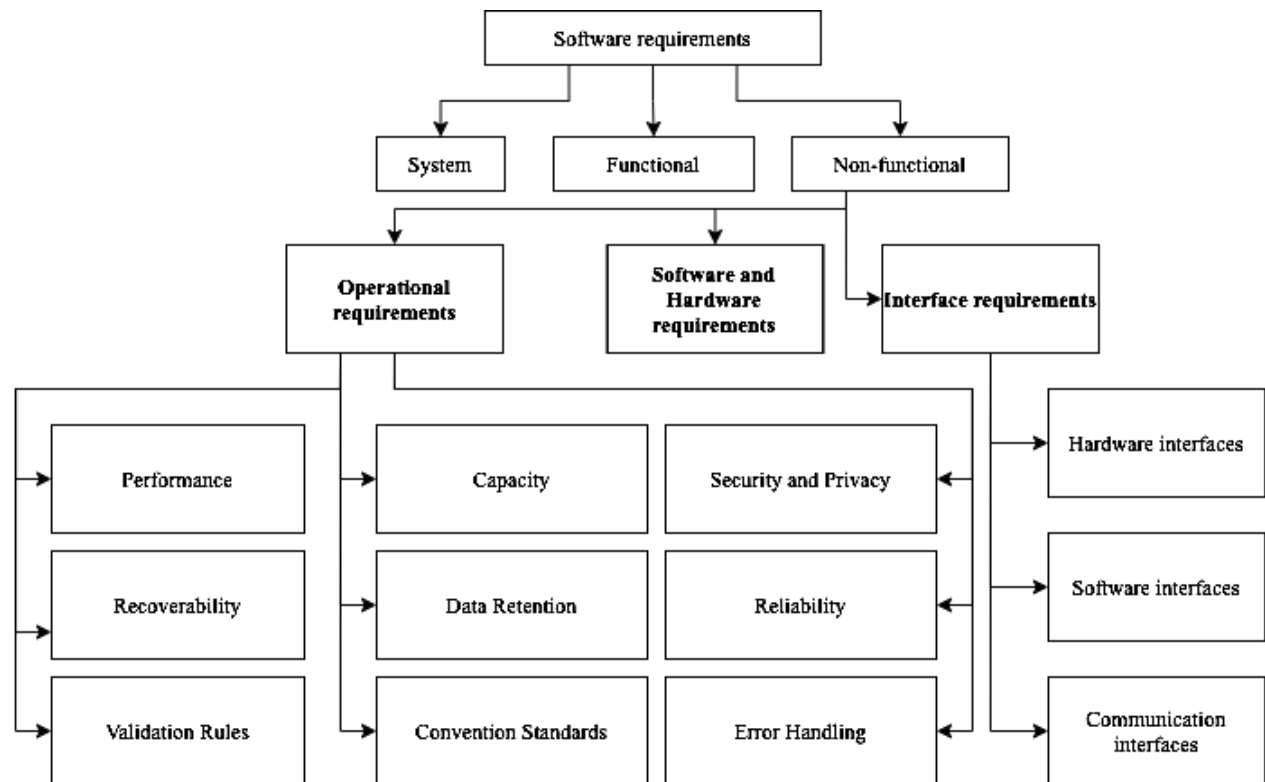


Fig. 4. Software components classification

The ISO 9126 defines the following security metrics covering the characteristics under study:

- ability to track access: $X = A / B$, where, A is the number of “user accesses to the system and data” registered in the access history database, B is the number of “user accesses to the system and data” performed during the assessment process;

- access control: $X = A / B$, where, A is the number of detected prohibited operations of various types, B is the number of prohibited operations of various types specified in the specification;

- prevention of data corruption: $X = 1 - A / N$, where, A is the number of occurrences of the main cases of data corruption, N is the number of test data that tried to cause data corruption;

Also, the standard defines the metrics of software quality characteristics that have a negative impact on security metrics:

- analyzability characteristic: a metric of analyzability (Can the user accurately identify the action that led to the failure? Can the maintainer easily pinpoint the action that led to the failure?): $X = A / B$, where, A - Number data actually recorded during operation, B - The amount of data that was planned to

be recorded and sufficient to observe the state of the software during operation;

- performance characteristic: performance metric (How many tasks can be successfully completed in a given period of time?): $X = A / T$, where A is the number of completed tasks, T is the observation time.

- mutability characteristic: metric of the complexity of the modification (Can the maintainer easily change the software to solve the problem?): $T = \text{Sum}(A / B) / N$, A - Work time spent on the change, B - The amount of software change, N - Number of changes;

- consistency and maintainability characteristic: a metric of the degree of consistency in maintainability (How well maintainability of products complies with applicable regulations, standards and conventions?): $X = 1 - A / B$, where, A – number of points of consistency in maintainability that were not met during testing, B - total number of specified maintainability consistency points. Based on the research carried out, a matrix of the influence of models and methods that increase software security on the metrics of other characteristics of software quality has been formed. These matrices are presented in Table 1.

Table 1 – Influence of basic characteristics of software quality on characteristics of its security

	Ability to track access	Controlled access	Data corruption prevention
Analyze ability	+	—	—
Modification difficulty	+	+/-	+
Consistency and maintainability	+	+/-	—
Performance	+	+	+

For example:

- to increase the value of the metric of the ability to track access, mechanisms such as obfuscation, encryption, access control lists (ACL), etc. are used. These mechanisms introduce additional non-functional (redundant) actions, which leads to a decrease in performance, the ability to analyze, and increases the complexity of the modification and decreases the maintainability;

- to increase the value of the access control metric, authorization mechanisms, digital signatures, access control lists (ACL) are used. Additional checks lead to performance degradation. If it is possible to grant access rights to authorized representatives of the company, these mechanisms do not affect other studied metrics;

- to increase the value of the metric for preventing data corruption, digital signature and checksum methods are used, which increases the complexity of the modification, and also affects performance due to the redundancy of the code. Thus, the need to solve the problem of increasing software security while simultaneously meeting the

requirements for the main indicators of its quality is actualized.

Conclusions and prospects for further development

1. A software security model has been investigated. The necessity to develop this model is shown by introducing the possibility of adapting existing requirements for the security of software tools throughout the entire life cycle of software development.

2. Research of the quality characteristics of software showed that to ensure its security, it is necessary to improve the following characteristics: integrity, authentication, confidentiality, access control. However, it was shown that an increase in these characteristics can lead to a deterioration in other indicators of software quality: portability, maintainability, performance.

The findings showed the feasibility of developing research in the direction of improving software quality indicators while minimizing their influence on each other.

REFERENCES

1. Klimchak, M. (2018), "PwC Global Economic Crime and Fraud Survey 2018: Ukrainian findings", *PWC Ukraine*, available at: <https://www.pwc.com/ua/uk/survey/2018/pwc-gecs-2018-ukr.pdf>.
2. Krul, S. (2008), "Crimes in the Sphere of informative Technologies: the national and international Aspects", *Actual problems of improving of current legislation of Ukraine*, Vol. 20, pp. 200-204, available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/apvchzu_2008_20_32.
3. Krasnyansky, B. (2011), "PwC World Review of Economic Crimes", *PWC Ukraine*, available at: https://www.pwc.com/ua/uk/press-room/assets/gecs_ukraine_ua.pdf.
4. Roger A. Grimes (2017), *Hacking the Hacker: Learn from the Experts Who Take Down Hackers*, Chapter: *Software Vulnerabilities*, DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119396260.ch6>.
5. Robert H. Sloan, Richard Warner (2019), *Why Don't We Defend Better?*, Chapter 6: *Software Vulnerabilities*, available at: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/software-vulnerabilities-robert-sloan-richard-warner/10.1201/9781351127301-2>.
6. M. Aldea, D. Gheorghică and V. Croitoru (2020), "Software Vulnerabilities Integrated Management System", *2020 13th International Conference on Communications (COMM)*, Bucharest, Romania, pp. 97-102, DOI: <https://doi.org/10.1109/COMM48946.2020.9141970>.
7. Kovalenko, A. and Kuchuk H. (2018), "Methods for synthesis of informational and technical structures of critical application object's control system", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 22–27, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>.
8. Ruban, I., Kuchuk, H. and Kovalenko A. (2017), "Redistribution of base stations load in mobile communication networks", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No 1 (1), P. 75–81, doi: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.075>.
9. Mozhaev, O., Kuchuk H., Kuchuk, N., Mozhaev, M. and Lohvynenko M. (2017), "Multiservice network security metric", *IEEE Advanced information and communication technologies-2017*, Proc. of the 2th Int. Conf, Lviv, pp. 133-136, DOI: <https://doi.org/10.1109/AIACT.2017.8020083>.
10. *Law of Ukraine "On Copyright and Related Rights"* (1993), available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3792-12?lang=en#Text>.
11. (2018), ISO/IEC/IEEE 29148 Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering, available at: <https://www.iso.org/ru/standard/72089.html>.
12. (2001), ISO/IEC 9126-1 Software engineering — Product quality — Part 1: Quality model, available at: <https://www.iso.org/ru/standard/22749.html>.
13. (2017), ISO/IEC/IEEE 12207 Systems and software engineering — Software life cycle processes, available at: <https://www.iso.org/ru/standard/63712.html>.
14. (2015), ISO/IEC 25024 Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuARE) — Measurement of data quality, available at: <https://www.iso.org/ru/standard/35749.html>.
15. (2011), ISO/IEC 25010 Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuARE) — System and software quality models, available at: <https://www.iso.org/ru/standard/35733.html>.
16. (2008), ISO/IEC 25012 Software engineering — Software product Quality Requirements and Evaluation (SQuARE) — Data quality model, available at: <https://www.iso.org/ru/standard/35736.html>.

Received (Надійшла) 12.11.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.01.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Семенов Сергій Геннадійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Обчислювальна техніка та програмування", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Serhii Semenov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: s_semenov@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4472-9234>.

Давидов Вячеслав Вадимович – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Viacheslav Davydov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: vyacheslav.v.davydov@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2976-8422>.

Гребенюк Дарина Сергіївна – аспірантка кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Daryna Hrebeniuk – graduate student of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: darina.gg1@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5331-2444>.

**Дослідження моделі та вимог
до безпеки програмного забезпечення**

С. Г. Семенов, В. В. Давидов, Д. С. Гребенюк

Анотація. Предметом дослідження в статті є модель забезпечення безпеки програмного забезпечення. Метою роботи є дослідження характеристик якості програмного забезпечення і вимог до безпеки програмних засобів з метою підвищення їх безпеки. У статті вирішуються наступні **завдання**: дослідження недоліків існуючої моделі забезпечення безпеки з метою виявлення основних її недоліків; дослідження характеристик якості програмного забезпечення, що впливають на її захищеність з метою виявлення можливості підвищення якості програмного забезпечення. Отримані наступні **результати**: на основі проведеного аналізу існуючої моделі забезпечення безпеки програмного забезпечення були виявлені основні особливості атрибуту даної моделі, наведено їх переваги і недоліки. На основі проведеного аналітичного дослідження доведено необхідність вдосконалення існуючої моделі забезпечення безпеки програмних засобів. Розглянуто існуючі вимоги до програмного забезпечення та характеристики, що впливають на його якість. Виділено характеристики захищеності програмного забезпечення, показники яких повинні бути поліпшені. **Висновки**: досліджена модель забезпечення безпеки програмного забезпечення. Показана необхідність розвитку даної моделі шляхом введення можливості адаптації існуючих вимог до безпеки програмних засобів протягом усього життєвого циклу розробки програмного забезпечення; дослідження характеристик якості програмного забезпечення показало, що для забезпечення її захищеності необхідно підвищити наступні характеристики: цілісність, аутентифікація, конфіденційність, управління доступом. Однак, показано, що підвищення даних показників може спричинити за собою погіршення інших показників якості програмного забезпечення: переносимості, супроводжує, продуктивності.

Ключові слова: безпека програмного забезпечення; життєвий цикл програмного продукту; кіберзлочинність.

**Исследование модели и требований
безопасности программного обеспечения**

С. Г. Семёнов, В. В. Давыдов, Д. С. Гребенюк

Аннотация. Предметом исследования в статье является модель обеспечения безопасности программного обеспечения. Целью работы является исследование характеристик качества программного обеспечения и требований к безопасности программных средств с целью повышения их безопасности. В статье решаются следующие **задачи**: исследования недостатков существующей модели обеспечения безопасности с целью выявления основных её недостатков; исследование характеристик качества программного обеспечения, влияющих на её защищённость с целью выявления возможности повышения качества программного обеспечения. Получены следующие **результаты**: на основе проведенного анализа существующей модели обеспечения безопасности программного обеспечения были выявлены основные особенности атрибуты данной модели, приведены их достоинства и недостатки. На основе проведенного аналитического исследования доказана необходимость совершенствования существующей модели обеспечения безопасности программных средств. Рассмотрены существующие требования к программному обеспечению и характеристики, влияющие на его качество. Выделены характеристики защищённости программного обеспечения, показатели которых должны быть улучшены. **Выводы**: исследована модель обеспечения безопасности программного обеспечения. Показана необходимость развития данной модели путем введения возможности адаптации существующих требований к безопасности программных средств на протяжении всего жизненного цикла разработки программного обеспечения; исследование характеристик качества программного обеспечения показало, что для обеспечения её защищённости необходимо повысить следующие характеристики: целостность, аутентификация, конфиденциальность, управление доступом. Однако, показано, что повышение данных характеристик может повлечь за собой ухудшение других показателей качества программного обеспечения: переносимости, сопровождаемость, производительность.

Ключевые слова: безопасность программного обеспечения; жизненный цикл программного продукта; киберпреступность.

Oleksandr I. Tymochko¹, Volodymyr Larin¹, Maksym Kolmykov¹,
Oleksander O. Timochko², Vladislava Pavlenko³

¹ Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

² Kreditech Holding, Hamburg, Germany

³ V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

RESEARCH OF IMAGES FILTRATION METHODS IN COMPUTER SYSTEMS

Abstract. It is known that human eyes are less sensitive to color, than to their brightness. In the RGB color space, all three components are considered equally important, and they are usually stored with the same resolution. However, you can display a color image more efficiently, separating the brightness from color information and presenting it with a higher resolution than color. RGB space is well suited for computer graphics, because it uses these three components for color formation. However, RGB space is not very effective when it comes to real images. The fact is that to save the color of an image, you need to know and store all three components of the RGB, and if one of them is missing, it will greatly distort the visual image representation. Also, when processing images in RGB space, it is not always convenient to perform any pixel conversion, because, in this case, it will be necessary to list all three values of the RGB component and write back. This greatly reduces the performance of various image processing algorithms. For these and other reasons, many video standards use brightness and two signals that carry information about the red and blue components of the signal, as a color model other than RGB. The most famous among such spaces is YCbCr.

Keywords: image; component; algorithm; standard; computer systems.

Introduction

Problem statement. The rapid development of information technologies led to the use of unidirectional specific images transmission in computer systems. According to that, in order to improve the quality of computer systems in public institutions, active implementation of such systems is taking place [1-3]. The main difficulty in working with video are large volumes of transmitted information and sensitivity to delays in the video information transmission. Therefore, in order to eliminate the maximum redundancy amount in the formation of the video sequence, 3 types of frames are used: I, P and B which form a frame group [4-7]. For a typical low complexity video sequence, the weight of each P-frame in the stream is approximately three times smaller than the I-frame weight. However, taking into account the number of P-frames in the group, they make the main contribution to the total video data amount. Therefore, the possibility of upgrading coding methods for P-frames is considered on preliminary blocks' type identification with the subsequent formation of block code structures.

It has been analysed the images filtration methods in the computer systems and its drawbacks has found during processing video data.

Research publications. A lot of researchers have investigated the images filtration methods. A comparison of international standards for lossless still image compression was made in [8-11] and in this case they have thoroughly investigated the compression ratio of all the well-known compression methods available at that time. However, the comparison in [12-14] does not deal with analysis of the latest computer systems standard. Another issue is that consideration is only given to still images.

In [15], the compression ratio and execution time of the compression methods was investigated. In addition, they investigated the efficiency of compression methods

based only on textual data and still images. Unmoving images are very different from the dynamic images in a differential-represented frame scenario.

Another study on the comparison of compression methods was conducted in [16]. They applied many compression standards and some compression programs to different dynamic images. They have compared both the compression ratio and the execution time of the compression techniques. They have pointed out that the compression performance depends on the type of images and the implication of this is that these results cannot be directly applied to dynamic images in a differential-represented frame scenario because of the different types of obstacles.

To ensure the timely delivery of video information resources, it is necessary to take into account the high-speed capabilities of communication channels. To do this, data compression algorithms are used.

The research aims and objectives. The aim of the study is to investigate of images filtration methods in computer systems for reducing time of information processing taking into account the limitations of data processing.

Research bases

Previous Images Filtration. Selection of the bright component. It is known that a color image requires at least three numbers per pixel to accurately convey its color. The method chosen to represent the brightness and color is called the color space [17].

There are three most common color models:

- RGB (used in computer graphics);
- YCbCr (used in video systems);
- CMYK (used in the color press).

All color spaces can be listed from the RGB space that can be obtained from the camera or scanner. The red, green, and blue are the main components of the colors represent three dimensions of this space, as shown in Fig. 1.

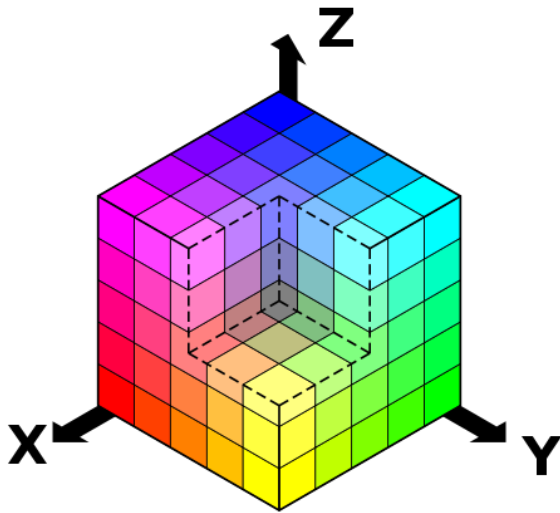


Fig. 1. RGB-colored model presented as a cube

RGB space is well suited for computer graphics, because it uses these three components for color formation [18]. However, RGB space is not very effective when it comes to real images. The fact is that to save the color of an image, you need to know and store all three components of the RGB, and if one of them is missing, it will greatly distort the visual image representation. Also, when processing images in RGB space, it is not always convenient to perform any pixel conversion, because, in this case, it will be necessary to list all three values of the RGB component and write back. This greatly reduces the performance of various image processing algorithms. For these and other reasons, many video standards use brightness and two signals that carry information about the red and blue components of the signal, as a color model other than RGB. The most famous among such spaces is YCbCr [19].

It is known that human eyes are less sensitive to color, than to their brightness. In the RGB color space, all three components are considered equally important, and they are usually stored with the same resolution. However, you can display a color image more efficiently, separating the brightness from color information and presenting it with a higher resolution than color.

The letter Y in such a color space denotes the component of brightness, which is calculated, as a weighted averaging of components R, G and B under the following formula:

$$Y = k_r R + k_g G + k_b B, \quad (1)$$

here is k - denotes the corresponding weight factor.

According to the recommendation of the ITU R BT.601 [20] the following ratios are proposed $k_r = 0,229$: and $k_b = 0,114$. The multiplier k_g is derived from the relation $k_r + k_g + k_b = 1$. Using these values, it is obtained a wide spread formula:

$$Y = 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,144 \cdot B. \quad (2)$$

In order to process images in this work, the bright component of the YCbCr color space is used. Accordingly, in order to reach this, by using the formula

2 in the software Mathcad 15. Noises in images no system provides the perfect image quality for the object under research. Images during the process of forming their systems (photographic, holographic, and television) are usually exposed to various occasional interference or noise. A fundamental problem in the field of image processing is the effective noise removal, while preserving the image's parts which are important for further recognition [21, 22]. The complexity of the solution to this problem depends much on the noise's nature. In contrast to the deterministic distortions described by the functional transformations of the original image, additive models, pulse and multiplicative noise are used to describe and influences.

The most common type of interference is the random additive noise, which is independent from the signal. The additive noise model is used when the signal at the system's output or at some transformation stage. It can be considered as the sum of the useful signal and some random signal. The additive noise model describes well the effect of the film graininess. The fluctuation noise in the radioengineering systems, quantization noise in analog-to-digital converters, and the like.

Additive Gaussian noise is characterized by adding to each pixel images of values with normal distribution and with zero mean values. Such noise, usually, occurs during the digital image formation. Basic images information is contours of objects.

Classic linear filters can effectively eliminate, but the degree of small parts blurriness the image may exceed the permissible values.

Pulsed noise is characterized by the replacement of pixels' part in the image, with the values of a fixed or random variable. The automated digital image quality assessment carried out using the metric of objective image quality – Peak Signal to Noise Ratio (PSNR):

$$PSNR = 10 \cdot \log \left(255^2 / \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2 / N} \right), \quad (3)$$

here are: X_i – pixel of the image with which it is compared; Y_i – pixel of the image being compared; N – the number of image pixels.

In the image, such interferences look like isolated contrast points, an example of output and distorted impulse noise of an image with a density of 5% is shown in Fig. 2 and 3 respectively. Peak signal to noise ratio in this case: $PSNR = 9,213$. Pulse noise is typical of devices for inputting images from a television camera, image transfer systems via radio channels, as well as for digital imaging and transfer systems.

The use of linear filtration in this case is ineffective - each of the input pulses gives feedback in the form of a pulse filter's characteristic, and their aggregate contributes to the noise spread in the entire area of the image. To remove impulse noise, a special class of nonlinear filters based on rank statistics is used. The common idea of such filters is to detect the position of the pulse and replace it with the estimated value, while maintaining other pixels of the image unchanged.



Fig. 2. Output Image



Fig. 3. Image distorted by impulse noise

Median image filtering. A successful solution to solve an impulse noise is to use median filtration proposed by John Tuke [23] for the analysis of economic processes. It should be noticed that median filtration is a heuristic processing method, its algorithm is not a mathematical solution to a strictly formulated problem. Therefore, the researchers pay much attention to the analysis of the image effectiveness processing on its basis and comparison with other methods.

When applying a median filter, each image pixel is sequentially processed. For median filtration, a two-dimensional window (filter aperture) is used, usually has a central symmetry, with its center located at the current filtration point. The dimensions of the aperture are among the parameters that are optimized in the process of analyzing the algorithm efficiency. Image pixels, that appear within the window, form a working sample of the current step.

However, as discussed above, median filtering smoothens the image borders to a lesser degree than any linear filtering. The mechanism of this phenomenon is very simple and is as follows. Assume that the filter aperture is near the boundary separating the light and image's dark areas, with its center located in the dark area. Then, most likely, the work sample will contain more elements with small brightness values, and, consequently, the median will be among those elements of the work sample that match this area of the image. The situation changes to the opposite, if the aperture center is shifted to the region of higher brightness. But this means the presence of sensitivity in the median filter to brightness variations.

Filling the values operation of the median filter for the pixel value of the elementary object will correspond to the following expression:

$$y_k = x_{i,j}, \begin{cases} i = k - \lfloor k/m \rfloor \cdot m, j = \lfloor k/m \rfloor, \\ k = 0..(2m+1)^2 - 1 \end{cases} \quad (4)$$

here are: $x_{i,j}$ - the value of the pixel of the original image with coordinates i and j ; y_k - a set of pixels' values included in the function's structure of the median filter; k - pixel values' index of the median filter; m - the radius of the median filter.

Fig. 3 gives an explanation of the performed medial filtering operations, and shows the location of the median filter elements' values for radius values. In this case, the final, resulting value of the median filter will be obtained after sorting the found items by their value.

$$\begin{cases} \{y'_k\} = \{y'_0 \geq y'_1 \geq y'_2 \geq \dots \geq y'_{(2m+1)^2 - 1}\}; \\ \{y''_k\} = \{y'_0 \leq y'_1 \leq y'_2 \leq \dots \leq y'_{(2m+1)^2 - 1}\}, \end{cases} \quad (5)$$

here are: $\{y'_k\}$ - a declinely sorted collection of the values of the median filter's function; y'_0 - the pixel's first value in the sorted set structure of all values of the median filter's function; y'_1 - the pixel's second value in the sorted set structure of all values of the median filter's function; $(2m+1)^2 - 1$ - the maximum number of median filter's elements for a rectangular window; m - the median filter's radius.

The value $y'_{((2m+1)^2 - 1)/2}$ will be the median value of the median filter. Therefore, it will be the solution of processing one pixel. In order to find the following values, the window function shifts to the right and when the image border reaches down one pixel down and moves from the original zero position on the horizontal axis until the image boundary is reached. In the end, an array containing the found values of the median filter will be formed. In this work, the median filtering is implemented using the software package Mathcad 15, the functional diagram of the algorithm is shown in Fig. 4.

The example below describes the use of a rectangular median filter matrix, but applying a rectangular window has errors in finding the correct mean value. To minimize this error, use the window in the form of a "snowflake", which is given by the formula:

$$y_k = x_{i,j}, \begin{cases} |i| = |j|, |i| \leq m; \\ |i| \leq m, j = 0; \\ |j| \leq m, i = 0. \end{cases} \quad (6)$$

here is

$$\begin{cases} |i| = |j|, |i| \leq m; \\ |i| \leq m, j = 0; \\ |j| \leq m, i = 0. \end{cases} -$$

the condition for selecting the elements of the median filter for the window in the "snowflakes" form;

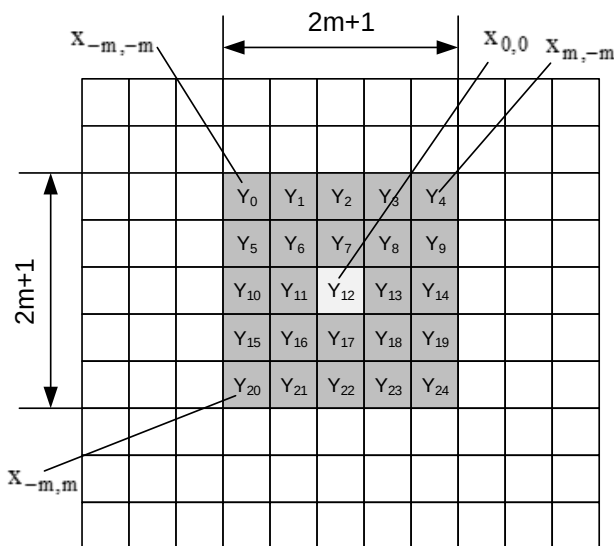


Fig. 4. Median filtering rectangular window

The explanation for median filtering for windows in the "snow flakes" for mand in the form of a circle are shown in Fig. 5 and Fig 6 respectively.

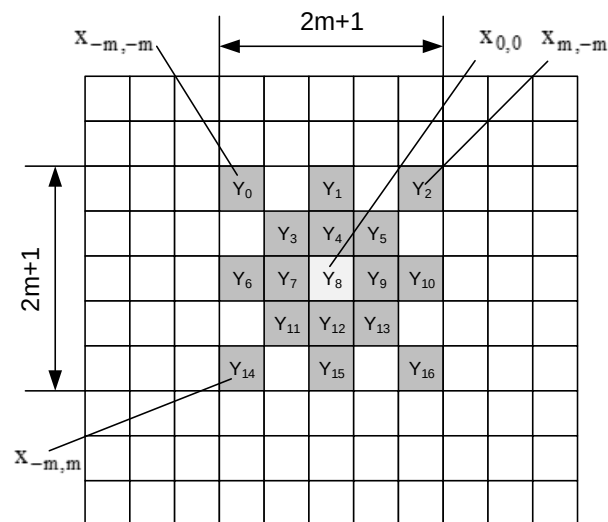


Fig. 5. Median filtering in the form of a "snow flake"

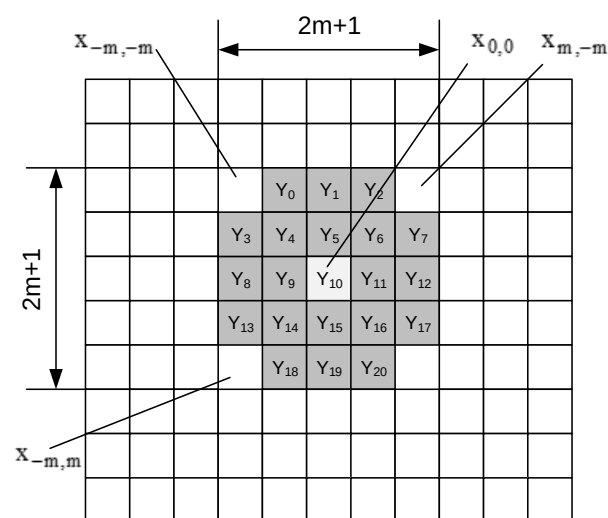


Fig. 6. Median filtering in a circle-shaped window

Each of these windows gives good results in analyzing individual image, so in order to a verify the result site suggested to use the average value obtained a result of separate three operations.

Examples of this algorithm's work for an image having an average saturation with small details given in Fig. 7, at various values of the size and type of filter aperture.



Fig. 7. Image distorted by impulse noise

Gauss filter. Often, all images have a lot of small details that greatly impede image processing, and may also result in some algorithms that are not working correctly, such as contour selection. Therefore, there is a need for pre-processing images that reduces the amount of small parts. Usually Gauss filter [18] is used to solve such problems. The Gauss filter is based on the Gaussian functions of one and two variables:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}; \quad (7)$$

$$G(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}.$$

Here are: σ – standard deviation of normal distribution, which specifies the "blurring degree" of the processed image; x, y – distance from the starting point (pixel) to the point for which the value of the function is calculated vertically and horizontally, respectively. In the general case, Gauss distribution has the form (Fig. 8).

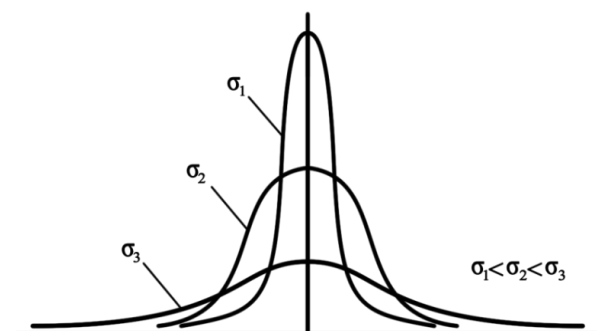


Fig. 8. The Gaussian distribution for different values

Thus, based on the Gauss function, a convolution matrix is constructed, for which the average weighted value of the neighboring pixels is calculated for each pixel of the image:

$$F_{m,n} = \sum_{i=-k}^k \sum_{j=-k}^k r_{m+i,n+j} G(i,j), \quad (8)$$

here is k – the dimension of the matrix of convolution.

As a result of applying the Gaussian filter, all distorted pixels (pixels, which brightness is very different from the brightness of the neighboring pixels) take an average value, noise is suppressed, and the contours of the objects are emphasized, which is very useful in recognizing images on digital images.

In this work, the Gauss filter is implemented by using the software package Mathcad 15. The value of the parameters is selected under condition [24-26]: the range of observation should be chosen to be the least. For each case, the execution time is calculated.

Binaryization of the image. Important stage of image processing and analysis is segmentation. In other words, this is the division of an image into an area for which a certain homogeneity criterion is performed. For example, the allocation of regions, which has approximately the same brightness. The concept of an image area is used to define a coherent group of image elements that have a certain common feature (property).

One of the basic and easy ways is segmentation using the threshold. The threshold is a feature (property) that helps to divide the desired signal into classes. The operation of the threshold division is to match the brightness value of each image's pixel with a given threshold value.

Operation of the threshold division, which eventually gives a binary image, is called binary operation. The purpose of the binarization operation is to drastically reduce the amount of information contained in the image. In the binarization process, the original halftone image having a certain number of brightness levels is converted into a black and white image whose pixels have only two values - 0 and 255.

The need of elimination a large number of errors in the binarization process, led to a large number of binary methods. They are divided into two groups, which are based on the construction of the threshold surface:

- global binarization methods;
- local binarization methods.

The threshold surface is a dimension matrix $M \times N$ corresponding to the size of the original image. Each matrix cell defines the threshold of binary brightness for the corresponding pixel in the original image. In the global binarization methods, the threshold surface is a plane with a constant threshold brightness value. In case of local binaryization methods, threshold brightness values change from point to image point, and is calculated based on some local features in the pixel vicinity or group of pixels.

The global binarization methods:

- binarization with the upper threshold: the simplest method. In this case, if the pixel's brightness, below the given threshold, is converted to black (0), the rest is white (255):

$$f'(m,n) = \begin{cases} 0, & f(m,n) \leq P; \\ 255, & f(m,n) > P. \end{cases} \quad (9)$$

- binarization with two thresholds: if the pixel's value is above the upper limit - it takes the maximum value (255), if the pixel is lowered (0), the pixels with values falling within the range of the thresholds take the fixed mean (127), which, usually, specified at the following stages [27-29]:

$$f'(m,n) = \begin{cases} 0, & f(m,n) \leq P_1; \\ 127, & P_1 < f(m,n) < P_2; \\ 255, & f(m,n) \geq P_2. \end{cases} \quad (10)$$

- Berns' binarization method. A simple square aperture with an odd number of pixels runs in a loop over all pixels of the original image. At each step are Min and Max for this aperture. The average value is found $P = (Min + Max)/2$. If the current pixel is larger than P - it becomes white (255), otherwise black (0).

Local binarization methods.

- Otts'binaryization method. This method uses a distribution histogram of the pixels' brightness values of the of the image. A histogram is constructed and based on values $h_i = n_i/N$, here is N - the total number of pixels in the image, n is the number of pixels with and brightness level. The brightness range is divided into two classes using the threshold brightness value k - the integer value from 0 to L . Each class corresponds to the relative frequencies w_0 w_1 :

$$\begin{aligned} w_0(k) &= \sum_{i=1}^k h_i; \\ w_1(k) &= \sum_{i=k+1}^L h_i = 1 - w_0(k); \\ \mu_0(k) &= \sum_{i=1}^k \frac{i \cdot h_i}{w_0}; \\ \mu_1(k) &= \sum_{i=k+1}^L \frac{i \cdot h_i}{w_1}. \end{aligned} \quad (11)$$

The method, which is proposed in this work, is an improved Burns' method. Burns' method has a great time to perform, so the following algorithm is proposed for improvement:

- the image is divided into blocks of some size (optional);
- for each block the threshold is determined;
- comparing the pixel value of the corresponding block with - the threshold value corresponding to this block.

Conclusions

1. For best results it is expedient to use for each image type your template size, as well as its type.
2. For the first type of image, it is better to choose a filter size of 5 pixels.
3. For all image types, regardless of the filter's size, the best result can be obtained by using a "snowflake" pattern.
4. An increase in the size of the filter is not feasible because it leads to an increase in the algorithm's running time and a "tampering" of the image.

REFERENCES

1. Yevseiev, S., Ahmed Abdalla, Osiievskiy, S., Larin, V. and Lytvynenko, M. (2020), "Development of an advanced method of video information resource compression in navigation and traffic control systems", *EUREKA: Physics and Engineering*, No. 5, pp. 31–42, DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001405>.
2. Mashtalir, S., Mikhnova, O. and Stolbovyi, M. (2018), "Sequence Matching for Content-Based Video Retrieval", *Proceedings of the 2018 IEEE 2nd International Conference on Data Stream Mining and Processing, DSMP*, art. no. 8478597, pp. 549–553, DOI: <https://doi.org/10.1109/DSMP.2018.8478597>.
3. Ruban, I., Smelyakov, K., Vitalii, M., Dmitry, P. and Bolohova, N. (2018), "Method of neural network recognition of ground-based air objects", *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT*, pp. 589–592.
4. Sumtsov, D., Osiievskiy, S. and Lebediev, V. (2018), "Development of a method for the experimental estimation of multimedia data flow rate in a computer network", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, Is. 2-92, pp. 56–64, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.128045>.
5. Pavlenko, M., Kolmykov, M., Tymochko, O., Khmelevskiy, S. and Larin, V. (2020), "Conceptual Basis of Cascading Differential Masking Technology", *2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, DOI: <https://doi.org/10.1109/deSSERT50317.2020.9125024>.
6. Hubbard, T. and Bor, R. (2016), *Aviation Mental Health: Psychological Implications for Air Transportation*, Routledge, London, 376 p.
7. Tyurin, V., Martyniuk, O., Mirnenko, V., Open'ko, P. and Korenivska, I. (2019), "General Approach to Counter Unmanned Aerial Vehicles", *2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*, DOI: <https://doi.org/10.1109/apuavd47061.2019.8943859>.
8. Mistry, D., Modi, P., Deokule, K., Patel, A., Patki, H. and Abuzagheh, O. (2016), "Network traffic measurement and analysis", *2016 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT)*, DOI: <https://doi.org/10.1109/LISAT.2016.7494141>.
9. Tkachov, V.M., Tokariyev V.V., Radchenko V.O. and Lebediev V.O. (2017), "The Problem of Big Data Transmission in the Mobile "Multi-Copter – Sensor Network" System", *Control, Navigation and Communication Systems*, Is. 2, pp. 154–157.
10. Mistry, D., Modi, P., Deokule, K., Patel, A., Patki, H. and Abuzagheh, O. (2016), "Network traffic measurement and analysis", *2016 IEEE Long Island Systems (LISAT)*, DOI: <https://doi.org/10.1109/LISAT.2016.7494141>.
11. Kharchenko N., Tristan, A. and Kharchenko N. (2014), "The Problem Aspect of Control of Bit Speed of the Video Stream in Telecommunication Networks", *International Conference TCSET'2014 [Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science]*, Lviv-Slavske, Ukraine, February 25 – March 1, 2014, pp. 533–534.
12. Donets, V., Kuchuk, N. and Shmatkov, S. (2018), "Development of software of e-learning information system synthesis modeling process", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No 2, pp. 117–121, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.20>.
13. Wang, S., Zhang, X., Liu, X., Zhang, J., Ma, S. and Gao, W. (2017), "Utility-Driven Adaptive Preprocessing for Screen Content Video Compression", *IEEE Transactions on Multimedia*, 19 (3), art. no. 7736114, pp. 660–667.
14. Pavlenko, M., Timochko, A., Korolyuk, N. and Gusak, M. (2014), "Hybrid model of knowledge for situation recognition in airspace", *Automatic Control and Computer Sciences*, Vol. 48, Is. 5, pp. 257–263.
15. Taylor, S.E. (2015), *Health psychology*, McGraw-Hill Education, New York, 430 p.
16. Popovskiy, V.V., Saburova, S.O., Oliynik, V.F., Losev, Yu.I. and Ageev, D.V. (2006), *Matematichni osnovi teoriiy telekomunikatsiy nih system*, SMIT, Kharkiv, 564 p.
17. Pavlenko, M.A. (2012), "Metody i procedury otbora operatorov ASU pri ispol'zovanii intellektual'nyh sistem podderzhki prinyatiya reshenij", *Zbirnik naukovih prac HUPS*, No. 4 (33), pp. 171–177.
18. Kharchenko, V. and Mukhina, M. (2014), "Correlation-extreme visual navigation of unmanned aircraft systems based on speed-up robust features", *Aviation*, Vol. 18, Is. 2, pp. 80–85, DOI: <https://doi.org/10.3846/16487788.2014.926645>.
19. Brown, T.A. (2015), *Confirmatory factor analysis for applied research*, Guilford Press, New York, 462 p.
20. Gonzales, R.C. and Woods, R.E. (2002), *Digital image processing*, Prentice Inc. Upper Saddle River, New Jersey, 779 p.
21. Ericsson, K.A., Charness, N., Feltovich, P.J. and Hoffman, R.R. (2018), *The Cambridge handbook of expertise and expert performance*, Cambridge University Press, New York, 918 p.
22. Wickens, C.D. (2015), *Engineering psychology and human performance*, Psychology Press, New York, 544 p.
23. Li, L. (2015), "The UAV intelligent inspection of transmission lines", *Proceedings of the 2015 International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics*, DOI: <https://doi.org/10.2991/ameii-15.2015.285>.
24. Carter M.W. and Price, C.C. (2017), *Operations research: a practical introduction*, Boca Raton, CRC Press, FL, 416 p.
25. Fletcher, R. (2017), *Practical methods of optimization*, John Wiley & Sons, New York, 456 p.
26. Larin, V., Yeromina, N., Petrov, S., Tantsiura, A. and Iasechko, M. (2018), "Formation of reference images and decision function in radiometric correlation-extremal navigation systems", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4, Is. 9, pp. 27–35, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139723>.
27. Qassim, H., Verma, A. and Feinzimer, D. (2018), "Compressed residual-VGG16 CNN model for big data places image recognition", *2018 IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, DOI: <https://doi.org/10.1109/ccwc.2018.8301729>.
28. Merlac, V., Smatkov, S., Kuchuk, N. and Nechausov A. (2018), "Resources Distribution Method of University e-learning on the Hyperconvergent platform", *Conf. Proc. of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Service and Technologies. DESSERT'2018*, Ukraine, Kyiv, May 24–27, pp. 136–140, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409114>.
29. Larin, V., Yerema, D. and Bolotska, Y. (2019), "The reasoning of necessity enhancing video privacy in conditions of providing the quality of the video information service provided in virtual infocommunication systems", *Sistemi ozbroennya i viyskova tehnika*, Vol. 2(35), pp. 158–162.

Received (Надійшла) 15.12.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Тимочко Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Oleksandr Tymochko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department Professor, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: tymochko.alex@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4154-7876>.

Ларін Володимир Валерійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри математичного та програмного забезпечення АСУ, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Volodymyr Larin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Mathematical and Software ACS Department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Volodymyr.Larin@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0771-2660>.

Колмиков Максим Миколайович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, докторант, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна;

Maksym Kolmykov – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, doctoral student, Air Force Science center, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: MaksymKolmykov@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1972-3543>.

Тимочко Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, інженер з тестування програмних продуктів фірми «Kreditech», Гамбург, Німеччина;

Oleksander Timochko – Expert Quality Assurance Engineer of Kreditech Holding, Hamburg, Germany;

e-mail: alexander.timochko@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0424-0426>.

Павленко Владислава Анатоліївна – студентка Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, Україна;

Vladislava Pavlenko – Student of V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Vladislava.Pavlenko@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0976-0252>.

Дослідження методів фільтрації зображень в комп'ютерних системах

О. І. Тимочко, В. В. Ларін, М. М. Колмиков, О. О. Тимочко, В. М. Павленко

Анотація. У статті вказується, що людські очі менш чутливі до кольору, ніж до їх яскравості. У кольоровому просторі RGB усі три компоненти вважаються однаково важливими, і зазвичай вони зберігаються з однаковою роздільною здатністю. Однак можливо ефективніше відображати кольорове зображення, відокремлюючи яскравість від кольорової інформації та представляючи його з вищою роздільною здатністю. Простір RGB добре підходить для комп'ютерної графіки, оскільки він використовує ці три компоненти для формування кольорів. Однак простір RGB не дуже ефективний, коли справа стосується реальних зображень. Справа в тому, що для збереження кольору зображення потрібно знати та зберігати всі три компоненти RGB, і якщо один із них відсутній, це сильно спотворить візуальне зображення. Крім того, при обробці зображень у просторі RGB не завжди зручно виконувати будь-яке перетворення пікселів, оскільки в цьому випадку буде потрібно перерахувати всі три значення компонента RGB і зробити зворотний запис. Це значно знижує продуктивність різних алгоритмів обробки зображень. З цих та інших причин багато стандартів відео використовують яскравість та два сигнали, що передають інформацію про червоний та синій компоненти сигналу, як кольорову модель, відмінну від RGB. Найвідоміший серед таких просторів – YCbCr. Було виявлено, що для досягнення найкращих результатів доцільно використовувати для кожного типу зображення розмір шаблону, а також його тип. Для зображення першого типу краще вибрати фільтр розміром 5 пікселів. Для всіх типів зображень, незалежно від розміру фільтра, найкращий результат можна отримати, використовуючи шаблон "сніжинка". Збільшення розміру фільтра неможливо, оскільки це призводить до збільшення часу роботи алгоритму та "фальсифікації" зображення.

Ключові слова: зображення; компонент; алгоритм; стандарт; комп'ютерні системи.

Исследование методов фильтрации изображений в компьютерных системах

А. И. Тимочко, В. В. Ларин, М. М. Колмыков, А. А. Тимочко, В. М. Павленко

Аннотация. В статье указывается, что человеческие глаза менее чувствительны к цвету, чем к их яркости. В цветовом пространстве RGB все три компонента считаются одинаково важными, и обычно они хранятся с одинаковой разрешающей способностью. Однако возможно эффективно отражать цветное изображение, отделяя яркость от цветовой информации и представляя его с более высоким разрешением. Пространство RGB хорошо подходит для компьютерной графики, поскольку он использует эти три компонента для формирования цветов. Однако пространство RGB не очень эффективен, когда дело касается реальных изображений. Дело в том, что для сохранения цвета изображения нужно знать и хранить все три компонента RGB, и если один из них отсутствует, это сильно исказит визуальное изображение. Кроме того, при обработке изображений в пространстве RGB не всегда удобно выполнять любое преобразование точек, поскольку в этом случае потребуется перечислить все три значения компонента RGB и сделать обратную запись. Это значительно снижает производительность различных алгоритмов обработки изображений. По этим и другим причинам многие стандарты видео используют яркость и два сигнала, передающие информацию о красном и синем компонентах сигнала, как цветную модель, отличную от RGB. Самым известным среди таких пространств есть YCbCr. Было обнаружено, что для достижения лучших результатов целесообразно использовать для каждого типа изображения размер шаблона, а также его тип. Для изображения первого типа лучше выбрать фильтр размером 5 пикселей. Для всех типов изображений, независимо от размера фильтра, лучший результат можно получить, используя шаблон "снежинка". Увеличение размера фильтра невозможно, поскольку это приводит к увеличению времени работы алгоритма и "фальсификации" изображения.

Ключевые слова: изображения компонент; алгоритм; стандарт; компьютерные системы.

Intelligent information systems

УДК 004.02

doi: 10.20998/2522-9052.2021.1.14

А. В. Казмірчук, О. Г. Жданова, В. Д. Попенко, М. О. Сперкач

Національний технічний університет України

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

РОЗВ'ЯЗАННЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ЗАДАЧІ СКЛАДАННЯ РОЗКЛАДУ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ

Анотація. Робота присвячена багатокритеріальній задачі складання розкладу, в якій задана множина робіт повинна бути виконана декількома виконавцями різної продуктивності. За виконання роботи відповідному виконавцю нараховується певна кількість бонусів, яка залежить від часу виконання роботи. Критеріями оцінки розкладу є загальний час виконання усіх робіт та кількість витрачених бонусів. В ході проведених досліджень були проаналізовані основні підходи до розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації, на основі яких обрано підхід Парето. В якості алгоритму було обрано генетичний алгоритм. **Метою даної роботи** є підвищення ефективності розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації шляхом реалізації евристичного алгоритму та підвищення його швидкодії. **Завданнями роботи** є визначення переваг та недоліків підходів, що використовуються для розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації, розробка генетичного алгоритму для розв'язання багатокритеріальної задачі складання розкладу та дослідження його ефективності. Розроблені оператори генетичного алгоритму, які враховують особливості досліджуваної задачі, та дозволяють отримувати в процесі роботи розв'язки Парето. Завдяки впровадженню паралельних обчислень в реалізації генетичного алгоритму вдалося підвищити його швидкість в порівнянні із звичайною версією. Розроблений алгоритм може бути використано при вирішенні задачі оптимального розподілу ресурсів, що є частиною системи нарахування бонусів співробітникам.

Ключові слова: задача складання розкладу; багатокритеріальна оптимізація; евристика; генетичний алгоритм; фронт Парето.

Вступ

Сьогодні процеси оптимізації та автоматизації є невід'ємною складовою нашого життя. Кожного дня ми займаємося плануванням наших ресурсів таким чином, щоб за оптимальних витрат отримати бажані результати. Такими основними ресурсами, наприклад, виступають час та гроші. У реальному житті ми стикаємося із ситуаціями, коли необхідно оптимізувати декілька ресурсів одночасно, що вже є складнішою задачею. Так, наприклад, при плануванні робіт на підприємстві необхідно досягти максимальної ефективності роботи при мінімальних витратах ресурсів. Такі задачі відносяться до класу задач багатокритеріальної оптимізації.

Дана задача активно досліджується вченими всього світу. У роботі [1] наведено короткий огляд багатокритеріальної оптимізації з використанням метавристичних. Представлено опис всіх використаних алгоритмів. Не дивлячись на те, що основний наголос в даній роботі робиться на еволюційні алгоритми, такі метавристики як оптимізація рою частинок, штучна імунна система та оптимізація мурашиних колон також досліджуються. У статті [2] аналізуються методи багатокритеріальної оптимізації, наводиться їх формулювання, переваги та недоліки. Ефективність обраних методів для цілей інженерного проектування визначається шляхом порівняння результатів, отриманих при рішенні тестових задач та реальної конструкторської інженерної задачі.

Робота [3] демонструє рішення задачі багатокритеріальної оптимізації за допомогою

розробленої модифікації еволюційного алгоритму SPEA2.

Як видно з практики, евристичні методи широко застосовуються та мають переваги над точними. Одним із найпопулярніших представників евристичних методів є генетичний алгоритм.

Мета та завдання роботи. Метою даної роботи є підвищення ефективності розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації шляхом реалізації евристичного алгоритму та підвищення його швидкодії. Завданнями роботи є визначення переваг та недоліків підходів, що використовуються для розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації, розробка генетичного алгоритму для розв'язання багатокритеріальної задачі складання розкладу та дослідження його ефективності.

Постановка задачі

Нехай задано множину робіт $J = \{1, 2, \dots, j, \dots, n\}$ і множину виконавців $M = \{1, 2, \dots, i, \dots, m\}$. Кожна робота може виконуватися будь-яким виконавцем. Передбачається, що виконавці мають різну швидкість виконання робіт v_i , $v_i > 0, i = \overline{1, m}$. Для j -ої роботи задано час виконання p_j та кількість бонусів $b_j > 0, j = \overline{1, n}$. Якщо $v_i > 0$ – швидкість i -го виконавця, то тривалість виконання j -ої роботи i -м виконавцем становить:

$$p_{ij} = p_j / v_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}.$$

Кількість бонусів, нарахованих i -му виконавцю за j -ту роботу, залежить від швидкості роботи цього виконавця і обчислюється за формулою:

$$b_{ij} = b_j / v_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}.$$

Загальну суму нарахованих бонусів за увесь обсяг робіт отримуємо з:

$$B = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} b_{ij} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{v_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} b_j,$$

де $a_{ij} \in \{0, 1\}$, $a_{ij} = 1$, якщо j -та робота призначена i -му виконавцю.

Нехай маємо деякий розклад виконання робіт. Позначимо через C_{ij} – момент завершення j -ї роботи i -м виконавцем. Загальний час виконання робіт визначається таким чином:

$$C_{\max} = \max_{ij} \{C_{ij}\}.$$

Необхідно скласти розклад виконання робіт, при якому загальний час завершення робіт множини J буде мінімальним, і при цьому загальна кількість нарахованих бонусів також буде мінімальною:

$$C_{\max} \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$B \rightarrow \min. \quad (2)$$

Методи розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації

Пошук одного чи більше оптимальних розв'язків називається багатокритеріальною оптимізацією, а задача називається задачею багатокритеріальної оптимізації [4-6]. Опис підходів до вирішення задач багатокритеріальної оптимізації наведено далі [7].

Підхід з використанням згортки. Цей підхід базується на перетворенні задачі багатокритеріальної оптимізації в задачу однокритеріальної оптимізації за допомогою скаляризації векторного критерію в один узагальнений, при цьому ваги кожного критерію визначаються користувачем. Це свого роду процес багатокритеріальної оптимізації, що базується на вподобаннях. Як тільки цільові функції (критерії) були визначені, цей метод призначає числове значення ваг кожній цільовій функції та потім комбінує значення зважених критеріїв в одну цільову функцію шляхом додавання або множення всіх зважених критеріїв, перетворюючи таким чином багатокритеріальну задачу оптимізації в однокритеріальну.

Переваги:

- простий для розуміння та використання.

Недоліки:

- вибір значень ваг є суб'єктивним та індивідуальним;

- втрачається можливість знайти інші корисні розв'язки, маючи кращий компроміс між критеріями;

- різні критерії з різними одиницями виміру вимагають відповідного процесу нормалізації, який часто є суб'єктивним;

- має проблему поєднання несумірних критеріїв;

- необхідність в декількох запусках алгоритму, заснованого на даному підході, для того, щоб отримати декілька компромісних розв'язків багатокритеріальної задачі.

Лексикографічний підхід. В його основу покладено розташування критеріїв в порядку пріоритетів. Це знову ж таки підхід, що базується на вподобаннях. Цей підхід працює наступним чином. Різні пріоритети призначаються різним критеріям, а потім критерії оптимізуються в порядку їх пріоритетів. Таким чином, коли два чи більше розв'язків порівнюються один з одним для того, щоб обрати найкращий, то їх показники ефективності порівнюються за критерієм, що має найвищий пріоритет. Якщо один розв'язок-кандидат краще іншого відповідно до цього критерію, то обирається саме він. Інакше, показники ефективності двох можливих розв'язків порівнюються відносно другого критерію. І знову ж, якщо розв'язок є кращим за другим критерієм, то він і обирається. Цей процес повторюється доти, поки не буде знайдено явного переможця або ж поки не будуть розглянуті всі критерії. В останньому випадку, якщо немає явного розв'язку-переможця, то можна обрати розв'язок, що оптимізує найбільш пріоритетний критерій.

Переваги:

- уникає проблеми поєднання несумірних критеріїв в одній формулі, розглядає кожен критерій окремо;

- володіє концептуальною простотою та зручністю використання.

Недоліки:

- визначення порогу допуску та відповідного ступеня важливості для кожного критерію суб'єктивне та довільне;

- послідовний за своєю природою.

Підхід Парето. Замість того, щоб перетворювати багатокритеріальну задачу оптимізації в однокритеріальну і потім вирішувати її за допомогою однокритеріального оптимізатора, використовується алгоритм багатокритеріальної оптимізації для вирішення оригінальної задачі. Замість одного оптимального розв'язку, як в задачах однокритеріальної оптимізації, даний підхід знаходить всі можливі оптимальні розв'язки і повертає набір недомінуючих оптимальних розв'язків, що називаються оптимальними розв'язками по Парето, або фронт Парето.

Переваги:

- ніколи не комбінує різні критерії в одній формулі, всі критерії розглядаються окремо;

- справляється із несумірними критеріями;

- результат у вигляді набору домінуючих розв'язків представлений у формі фронту Парето, що залишає можливість вибору користувачу підходящого оптимального розв'язку;

- уникає багаторазового запуску алгоритму.

Недоліки:

- набагато складніший, ніж інші два підходи.

Враховуючи переваги та недоліки всіх вищенаведених підходів, будемо використовувати підхід Парето.

Опис генетичного алгоритму

В якості алгоритму для багатокритеріальної оптимізації було обрано генетичний алгоритм. Важливою перевагою генетичних алгоритмів є те, що вони з самого початку працюють з великою популяцією кандидатів на розв'язки, і, відповідно, оптимальні по Парето розв'язки генеруються вже в першому поколінні. Таким чином, не зважаючи на складність поставленої задачі, можна отримати достатньо повну множину оптимальних по Парето розв'язків уже після першої ітерації процедури генетичного алгоритму при відносно невеликих затратах часу на обчислення [8].

Модифікація генетичного алгоритму для вирішення багатокритеріальної задачі оптимізації відрізняється від звичайної схеми оператором селекції, визначенням кращих особин популяції, обчисленням значення пристосованості особин та застосуванням підходу Парето. Отже, для кожної особини популяції (розкладу) обчислюються окремо значення кожного з двох критеріїв.

Після обчислення значень критеріїв застосовується підхід Парето. Для кожної особини

популяції визначається ранг границі Парето. Особини (розклади), що знаходяться безпосередньо на границі мають ранг 1. Якщо ми видалимо ці особини із популяції та визначимо нову границю, то особини нової границі матимуть ранг 2 і так далі. Отже, ранги визначаються таким чином: додаємо особину до границі, якщо вона не домінується іншими особинами, що вже перебувають на границі та видаляємо із границі всі особини, що домінуються новою особиною. Також для всіх особин кожного рангу обчислюється відстань до сусідніх особин (найближчих зліва та справа за значенням критерію (1)). Тоді для селекції особин поточної популяції та їх нащадків для створення нового покоління необхідно впорядкувати всіх особин по зростанню рангу i , після цього, по спаданню відстані до сусідніх особин. Таким чином до нового покоління потрапляють перші N особин. Відстань до сусідніх особин одного рангу необхідно обчислювати для того, щоб уникнути збіжності до локального мінімуму та зберегти різноманітність осіб популяції. Так, наприклад, позначені на рис. 1 особини мають в 2 рази більше шансів бути обраними в якості батьків для створення нащадків, що може призвести до хибних результатів.

Тому для наступного покоління обираються лише особини з великою відстанню до сусідніх особин.

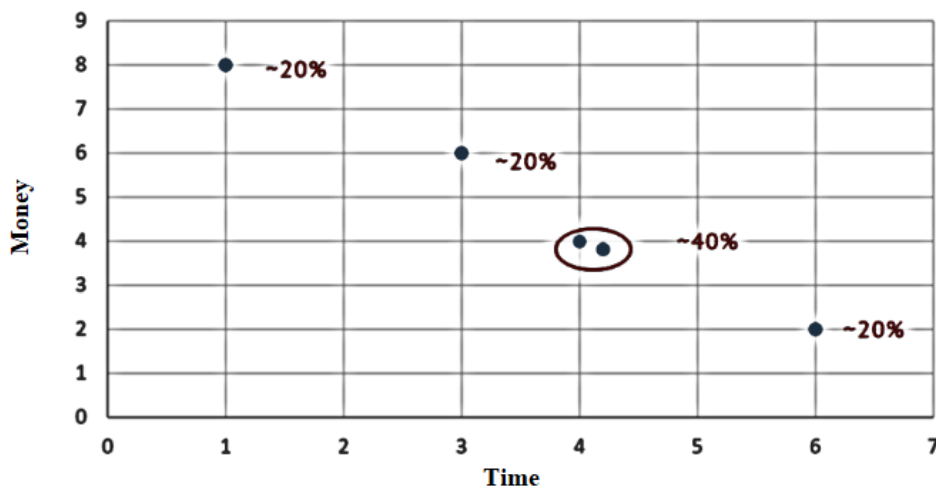


Рис. 1. Ілюстрація ймовірності селекції особин для створення нащадків
(Fig. 1. Illustration of the probability of selection of individuals to create offspring)

Схема роботи генетичного алгоритму для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації наведено нижче.

Крок 1. Згенерувати початкову популяцію.

Крок 2. Обробити популяцію.

Крок 2.1. Створити нащадків, використовуючи турнірний метод для вибору батьків.

Крок 2.2. Додати до поточного покоління всіх нащадків та нормалізувати значення фітнес-функцій – загальний час завершення робіт та загальна сума бонусів.

Крок 2.3. Визначити ранги особин відповідно до рівнів домінування.

Крок 2.3.1. Задати початкове значення рангу для всіх особин $r_i = -1, i = \overline{1, N}$ та додати до множини перевірки на домінантність всіх особин популяції.

Крок 2.3.2. Встановити початкове значення рангу $R = 1$.

Крок 2.3.3. Для кожної особини множини перевірки на домінантність перевіряємо чи є вона недомінуючою, тобто кращою хоча б по одному критерію та не гіршою за іншими критеріями відносно інших особин із множини перевірки на домінантність.

Крок 2.3.4. Для всіх особин, що є недомінуючими, присвоїти $r_i = R$ та видалити їх із множини для перевірки на домінантність.

Крок 2.3.5. Збільшити значення рангу $R+1$.

Крок 2.3.5. Якщо множин перевірки на домінантність не порожня, то перейти на КРОК 2.3.3, інакше перейти на КРОК 2.4.

Крок 2.4. Для особин кожного рангу обчислити відстань до сусідніх особин.

Крок 2.4.1. Відстань обчислюється як сума відстаней до лівої та правої сусідньої особи. Для першої та останньої особи рангу відстань рівна нескінченності.

Крок 2.5. Впорядкувати всіх особин популяції спочатку по рангу, а потім по спаданню відстаней між особами в межах кожного рангу.

Крок 2.6. Створити нову популяцію, що складається з перших N особин впорядкованої множини.

Крок 2.7. Якщо не досягнуто максимальної кількості популяцій, то перейти на КРОК 2, інакше перейти на КРОК 3.

Крок 3. Визначити множину рішень як множину особин першого рангу популяції – Парето фронт.

На рис. 2 проілюстровано приклад визначення відстаней між особинами популяції одного рангу. Тут позначено:

$l_1, \dots, l_5$ – відстані між двома особинами,

$\overline{d_1, \dots, d_5}$ – сума відстаней від особи до сусідніх особин зліва та справа, при цьому для крайніх точок (особин) відстань до сусідніх особин визначається як $\inf$ (дуже велике число).

На рис. 3 наведено приклад визначення рангів для двокритеріальної задачі мінімізації. Точки А, В, С із області I не домінуються точками із I та II областей, тобто вони є кращими хоча б по одному із критеріїв та не гіршими по інших критеріях. Аналогічно, точки D, F, K із області II не домінуються точкою М із області III. Таким чином, точки А, В, С належать до рангу 1 і складають множину оптимальних розв'язків по Парето. Точки D, F, K належать до рангу 2. Точка М належить до рангу 3.

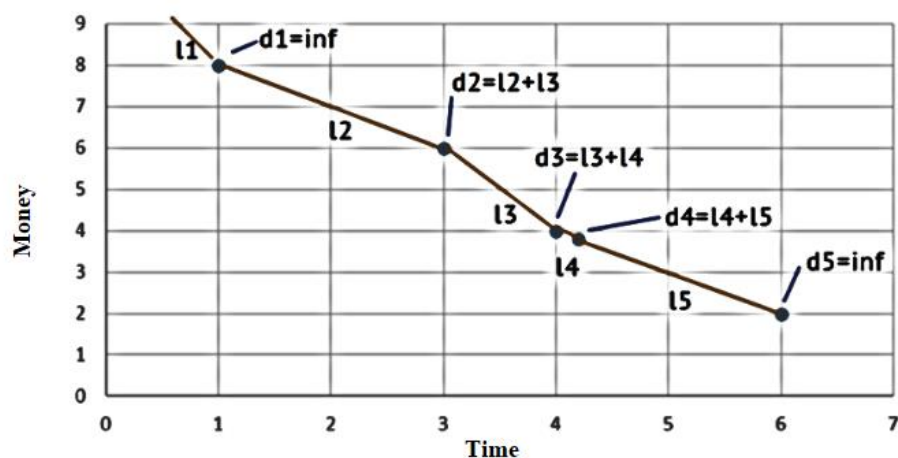


Рис. 2. Відстані між особинами одного рангу
(Fig. 2. Distances between individuals of the same rank)

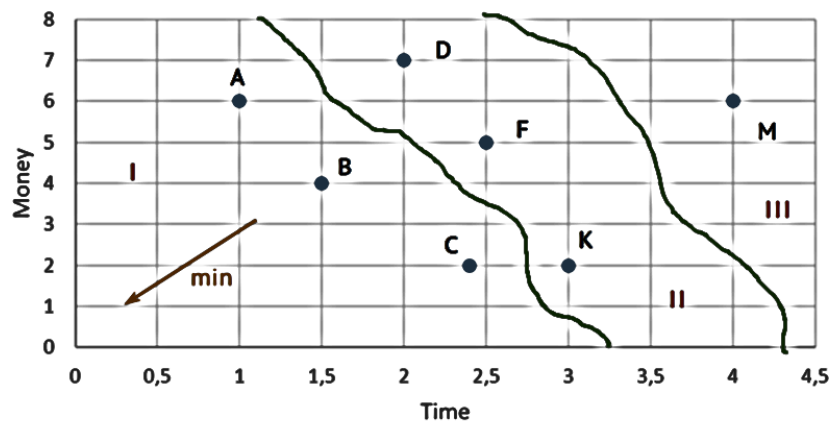


Рис. 3. Ранги відповідно до рівнів домінантності для двокритеріальної задачі мінімізації
(**Fig. 3.** Ranks according to the levels of dominance for the two-criteria minimization problem)

Для дослідження ефективності роботи алгоритму було розроблено його програмну реалізацію. Так, на рис. 4-6 відображено процес роботи генетичного алгоритму, зокрема множину особин-кандидатів на рішення задачі двокритеріальної оптимізації у 1-му, 100-му та 200-му поколіннях.

Як видно з вищенаведених рисунків, генетичний алгоритм з кожною ітерацією покращує множину кандидатів-розв'язків. Поступово розв'язки покращуються та групуються в лінію, що

містить множину оптимальних по Парето розв'язків (фронт Парето).

Також розроблений алгоритм було оптимізовано шляхом застосування паралельних обчислень в програмній реалізації генетичного алгоритму. Оскільки обчислення для кожної особини популяції відстані до сусідніх особин в межах рангу є незалежними операціями, то було застосовано розпаралелювання обчислень для даного кроку алгоритму.

Результати експериментів наведено на рис. 7.

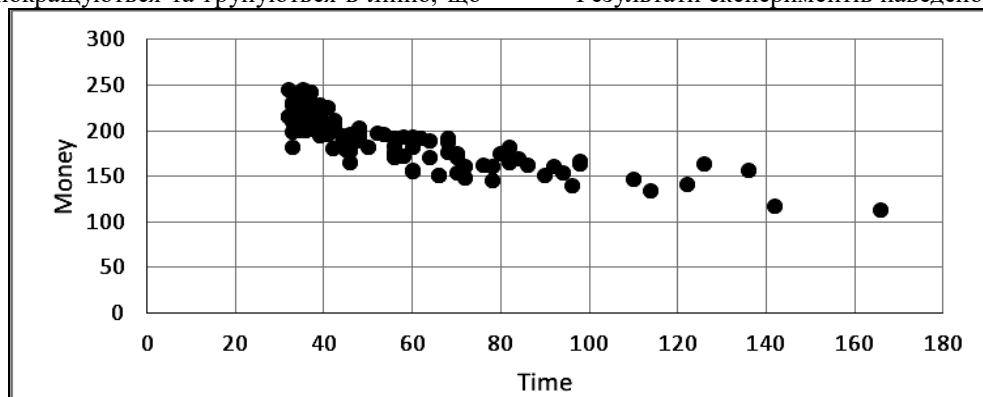


Рис. 4. Множина рішень-кандидатів в 1-му поколінні
(**Fig. 4.** A quantity of candidate solutions in the 1st generation)

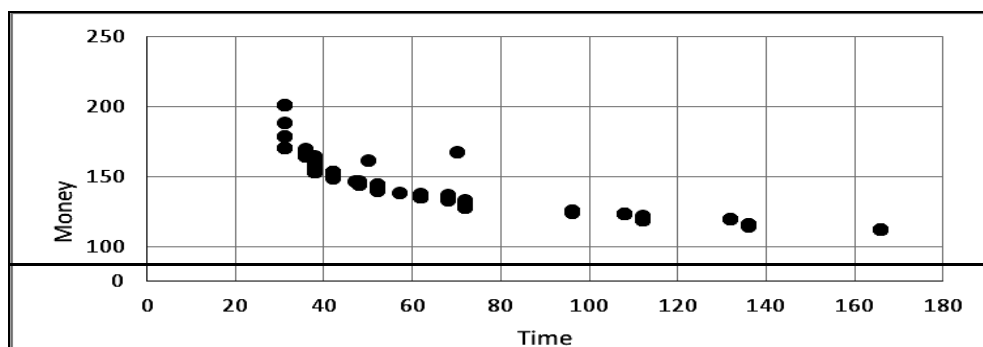


Рис. 5. Множина рішень-кандидатів в 100-му поколінні
(**Fig. 5.** A quantity of candidate solutions in the 100 generation)

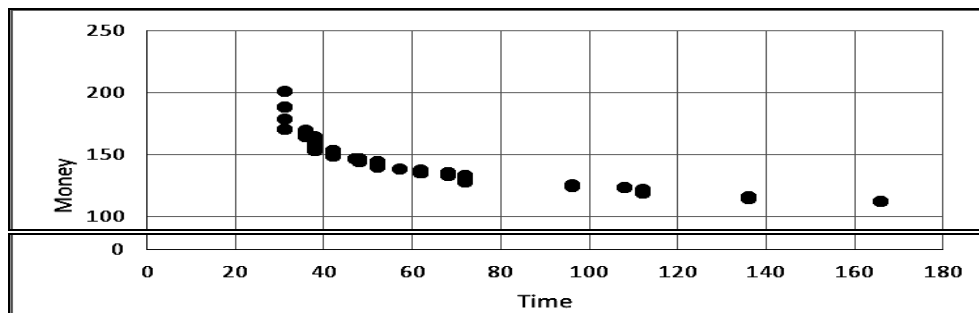


Рис. 6. Множина рішень-кандидатів в 200-му поколінні
(Fig. 6. A quantity of candidate solutions in the 200 generation)

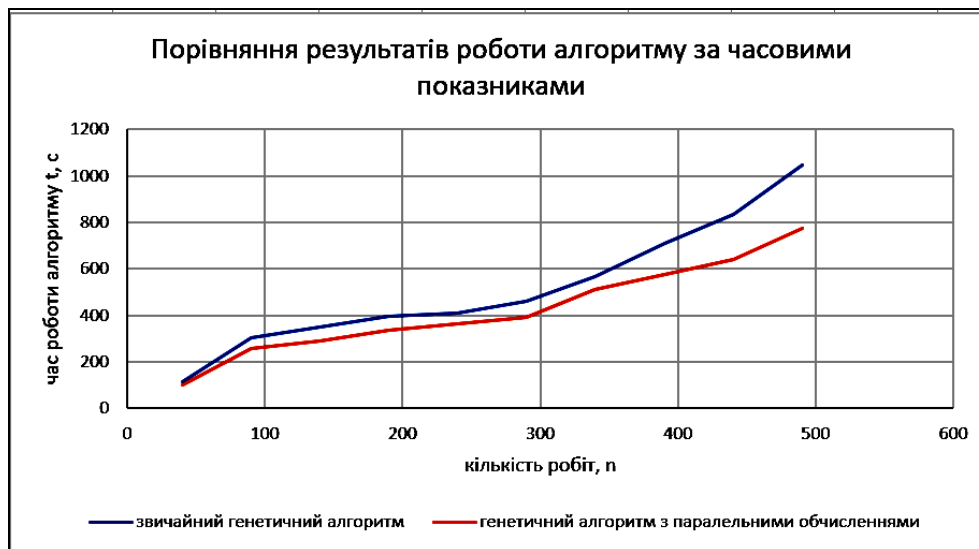


Рис. 7. Результати експериментальних досліджень
(Fig. 7. The results of experimental studies)

Експерименти проводились для задач наступної розмірності: кількість виконавців $m = 20$, кількість робіт n змінювалась від 40 до 490 з кроком 40 робіт.

Як видно із результатів дослідження, застосування паралельних обчислень в генетичному алгоритмі дає вигоду у швидкодії майже на 16% в порівнянні із його звичайною версією.

Висновки

В даній роботі було наведено огляд основних підходів для розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації, зокрема, підхід з використанням згортки, лексикографічний підхід та підхід Парето, описані їх переваги та недоліки.

На основі проведеного аналізу було визначено, що підхід Парето має значні переваги над іншими підходами, тому для розробки алгоритму було використано саме його.

Також для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації було обрано генетичний алгоритм, оскільки він з самого початку працює з великою популяцією кандидатів на розв'язки, і, відповідно, оп-

тимальні по Парето розв'язки генеруються вже в першому поколінні, що дозволяє при невеликих затратах часу на обчислення знайти множину оптимальних розв'язків.

Розроблено оператори генетичного алгоритму (селекція, визначення кращих особин популяції, обчислення значення пристосованості особин), які враховують особливості розв'язуваної багатокритеріальної задачі складання розкладу. Було проведено ряд досліджень ефективності роботи розробленого алгоритму. Завдяки впровадженню паралельних обчислень підвищено швидкість розробленого генетичного алгоритму приблизно на 16%.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що розроблений алгоритм може бути використано при вирішенні задачі оптимального розподілу ресурсів, що є частиною системи нарахування бонусів співробітникам.

Таким чином, вдасться отримати оптимальні розподіли завдань між працівниками, що дозволять при мінімальних витратах на бонусні виплати мінімізувати загальний час завершення виконання завдань.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Coello C.A.C. Multi-objective Optimization. *Handbook of Heuristics* / Martí, R., Panos, P., Resende, M. (eds). Cham: Springer, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07153-4_17-1.

2. Chianussu G., Codegone M., Ferreroc S., Varesio, F.E. Comparison of multi-objective optimization methodologies for engineering applications. *Computers & Mathematics with Applications*. 2012. Vol. 63, Is. 5. P. 912-942, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2011.11.057>.
3. Полковникова Н. А., Курейчик В. М. Многокритериальная оптимизация на основе эволюционных алгоритмов. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2015. № 2(163). С. 149-162.
4. Марченко И. В. Тема 8. Многокритериальная оптимизация. *Экономико-математические методы: конспект лекций*. Москва : МБИ, 2020. URL: http://eos.ibi.spb.ru/umk/4_4/5/print/5_R1_T8.pdf.
5. Ashis K.M., Mohapatra Yo., Anil K.M. Multi-Objective Genetic Algorithm: A Comprehensive Survey. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2012. Vol. 3, Is. 2. pp. 81-90.
6. Chang K. Multiobjective Optimization and Advanced Topics. *e-Design: Computer-Aided Engineering Design*. Academic Press, 2015. P. 1105-1173. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382038-9.00019-3>.
7. Tamil Selvi S., Baskar S., Rajasekar S. Application of Evolutionary Algorithm for Multiobjective Transformer Design Optimization. *Classical and Recent Aspects of Power System Optimization*. 2018. P. 463-504. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812441-3.00017-3>.
8. Ouattara A., Pibouleau L., Azzaro-Pantel C., Domenech S. Eco-design and Life Cycle Assessment of a chemical process: the case study of HDA (Pareto Front). *Computer Aided Chemical Engineering*. 2013. Vol. 32. P. 727-732, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63234-0.50122-6>.

REFERENCES

1. Coello, C.A.C. (2018), "Multi-objective Optimization", Martí R., Panos P., Resende M. (eds), *Handbook of Heuristics*, Springer, Cham, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07153-4_17-1.
2. Chianussu, G., Codegone, M., Ferreroc, S. & Varesio, F.E. (2012), "Comparison of multi-objective optimization methodologies for engineering applications", *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 63, Is. 5, pp. 912-942, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2011.11.057>.
3. Polkovnykova, N.A., Kurejchik, V.M. (2015), "Multiobjective optimization based on evolutionary algorithms", *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, No. 2(163), pp. 149-162.
4. Marchenko, I.V. (2020), "Topic 8. Multiobjective optimization", *Economic and mathematical methods: lecture notes*, IBI, Moscow, available at: http://eos.ibi.spb.ru/umk/4_4/5/print/5_R1_T8.pdf.
5. Ashis, K.M., Mohapatra, Yo., Anil, K.M. (2012), "Multi-Objective Genetic Algorithm: A Comprehensive Survey", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 3, Is. 2, pp. 81-90.
6. Chang, K. (2015), "Multiobjective Optimization and Advanced Topics", *e-Design: Computer-Aided Engineering Design*, Academic Press, pp. 1105-1173, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382038-9.00019-3>.
7. Tamil Selvi, S., Baskar S. & Rajasekar S. (2018), "Application of Evolutionary Algorithm for Multiobjective Transformer Design Optimization", *Classical and Recent Aspects of Power System Optimization*, pp. 463-504, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812441-3.00017-3>.
8. Ouattara, A., Pibouleau, L., Azzaro-Pantel, C., & Domenech, S. (2013), "Eco-design and Life Cycle Assessment of a chemical process: the case study of HDA (Pareto Front)", *Computer Aided Chemical Engineering*, Vol. 32, pp. 727-732, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63234-0.50122-6>.

Received (Надійшла) 22.11.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.01.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ ABOUT THE AUTHORS

Казмірчук Аліна Василівна – магістрантка кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Alina Kazmirchuk – master student of Computer-aided Management and Data Processing Systems Department, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine; e-mail: girl.lina.k@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3825-2441>.

Жданова Олена Григорівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Olena Zhdanova – PhD in Technical science, Associate Professor of Computer-aided Management and Data Processing Systems Department, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine; e-mail: zhdanova/elena@hotmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8787-846X>.

Попенко Володимир Дмитрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Volodymyr Popenko – PhD in Technical science, Associate Professor of Computer-aided Management and Data Processing Systems Department, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine; e-mail: volodp@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4500-2267>.

Сперкач Майя Олегівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Maïia Sperskach - PhD in Technical science, Associate Professor of Computer-aided Management and Data Processing Systems Department, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine; e-mail: sperskachmaya@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0251-2141>.

**Решение многокритериальной задачи составления расписания
с использованием генетического алгоритма**

А. В. Казмирчук, Е. Г. Жданова, В. Д. Попенко, М. О. Сперкач

Аннотация. Работа посвящена многокритериальной задаче составления расписания, в которой определенное множество работ должно быть выполнено несколькими исполнителями разной продуктивности. За выполнение работы соответствующему исполнителю начисляется количество бонусов, которое зависит от времени выполнения работы. Критериями оценки расписания являются общее время выполнения всех работ и общее количество бонусов. В ходе проведенных исследований были проанализированы основные подходы к решению задач многокритериальной оптимизации, на основании которых был выбран подход Парето. В качестве алгоритма был выбран генетический алгоритм. **Целью данной работы** является повышение эффективности решения задач многокритериальной оптимизации с помощью реализации эвристического алгоритма и повышения его быстродействия. **Заданиями работы** являются определение преимуществ и недостатков подходов, которые используются для решения задач многокритериальной оптимизации, разработка генетического алгоритма для решения задачи многокритериального составления расписания и исследование его эффективности. Разработаны операторы генетического алгоритма, которые учитывают особенности исследуемой задачи и позволяют получать в процессе работы решения Парето. Благодаря внедрению параллельных вычислений в реализации генетического алгоритма удалось повысить его быстродействие в сравнении с обычной версией. Разработанный алгоритм может использоваться при решении задачи оптимального распределения ресурсов, что является частью системы начисления бонусов сотрудникам.

Ключевые слова: задача составления расписания; многокритериальная оптимизация; эвристика; генетический алгоритм; фронт Парето.

**Solving a multicriteria scheduling problem
using a genetic algorithm**

Alina Kazmirchuk, Olena Zhdanova, Volodymyr Popenko, Maiia Sperkach

Abstract. The work is devoted to the multiobjective task of scheduling, in which a given set of works must be performed by several performers of different productivity. A certain number of bonuses is accrued for the work performed by the respective executor, which depends on the time of work performance. The criteria for evaluating the schedule are the total time of all jobs and the amount of bonuses spent. In the research the main approaches to solving multiobjective optimization problems were analyzed, based on which the Pareto approach was chosen. The genetic algorithm was chosen as the algorithm. **The purpose of this work** is to increase the efficiency of solving multicriteria optimization problems by implementing a heuristic algorithm and increase its speed. **The tasks of the work** are to determine the advantages and disadvantages of the approaches used to solve multicriteria optimization problems, to develop a genetic algorithm for solving the multicriteria scheduling problem and to study its efficiency. Operators of the genetic algorithm have been developed, which take into account the peculiarities of the researched problem and allow to obtain Pareto solutions in the process of work. Due to the introduction of parallel calculations in the implementation of the genetic algorithm, it was possible to increase its speed compared to the conventional version. The developed algorithm can be used in solving the problem of optimal allocation of resources, which is part of the system of accrual of bonuses to employees.

Keywords: schedule problem; multiobjective optimization; heuristics; genetic algorithm; Pareto front.

Serhii Chalyi, Volodymyr Leshchynskyi

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

CONSTRUCTION OF PATTERNS OF USER PREFERENCES DYNAMICS FOR EXPLANATIONS IN THE RECOMMENDER SYSTEM

Abstract. The subject of study in the article is the processes of constructing explanations in recommendation systems. **Objectives.** The goal is to develop a method of constructing patterns that reflect the dynamics of user preferences and provide an opportunity to form an explanation of the recommended list of items, taking into account changes in the user's requirements of the recommendation system. Construction of explanations taking into account the dynamics of changes in consumer preferences makes it possible to increase user confidence in the results of the intelligent system. **Tasks:** structuring models of temporal patterns of parallel-alternative and sequential-alternative users' choice of the recommendation system; development of a method for constructing patterns of changing user preferences using process mining technology; experimental verification of the method for constructing patterns of changing consumer preferences. **The approaches used are:** temporal logics, which determine the approaches to the description of the temporal ordering of a set of events. The following results are obtained. The structuring of models of temporal patterns of parallel-alternative and sequential-alternative users' choice of the recommendation system is performed; developed and performed an experimental test of the method of constructing patterns of user preferences dynamics. **Conclusions.** The scientific novelty of the results is as follows. The method of dynamics patterns construction of users' preferences for the formation of explanations concerning the recommended list of subjects is offered. The method sequentially generates a set of ordered events, each of which reflects the choice of the subject by a group of users at a certain time interval, and also builds a graph representation of the patterns of user preferences through intellectual analysis of processes. The patterns obtained as a result of the method consist of time-ordered pairs of events that reflect the knowledge of changing user preferences over time. Further use of such dependencies as elements of the knowledge base makes it possible based on probabilistic inference to build a set of alternative explanations for the received recommendation, and then arrange these explanations according to the probability of their implementation for the recommended list of subjects.

Keywords: recommendation system; recommendation; explanations; the process of explanations formation; temporal dependence.

Introduction

Recommendation systems offer consumers a list of items that may interest them, i.e. correspond to their preferences.

Such systems [1 - 3] are commonly used in conjunction with e-commerce systems. Thanks to the received recommendation, the consumer has the opportunity to choose from a limited list of items of interest to him, which greatly simplifies the purchase of goods and services in e-commerce systems.

Recommendations for target users are formed based on information about the choice of goods and services by similar users, as well as information about product ratings. Ratings reflect the degree of popularity of users, but they can be falsified as a result of attacks [4, 5] by virtual users, or shilling attacks.

The post-shilling recommendation is distorted because it reflects the requirements of both the target and attacking users. The user does not know how the recommendation construction algorithm works, has no information about the shilling attack, and therefore distorted recommendations ultimately force the user to abandon the use of the recommendation system.

In order for the user to trust the received recommendations and be able to take them into account even in the case of shilling attacks, the recommendation is combined with an explanation [6-8].

The explanation reveals the reasons and methods of obtaining a recommendation and sets the associative

links between the recommendation and knowledge of the subject area. Combining a recommendation with an explanation increases the chances [7, 9-10] that the user will purchase the recommended product or service.

However, both recommendations and explanations must be relevant as the user's preferences change [11-15].

Such changes can occur cyclically or evolutionarily. Therefore, when constructing explanations to the recommendations, it is important to take into account the dynamics of changes in user requirements over time, i.e. to describe the process of user selection using temporal knowledge.

The latter set the order in time for each pair of events [16, 18], when the user selects items, puts ratings, etc. The set of this knowledge forms the patterns of the dynamics of user preferences at the selected time interval. Automated formation of patterns based on temporal knowledge is performed by the method presented in [17].

Thus, the problem of constructing explanations to the recommendations using temporal knowledge of user preferences is relevant.

The solution to this problem requires the selection of typical elements of temporal knowledge, the construction of patterns from such elements based on the analysis of the sequence of user actions. The rules set the order in time for a pair of events. The probability of implementation of the rule is determined by its weight [18, 19].

To date, methods have been developed to construct explanations using temporal rules [20, 21].

The first method uses a set of temporal rules that determine changes in user preferences at a given time interval, such as a month, year. Explanations in the form of a numerical indicator are calculated using the weights of these rules.

Method [21] forms a description of the process of choosing a particular product by consumers in the form of a sequence of temporal rules. The explanation is formed as a numerical assessment of the user selection process. A common feature of these methods is that they explain to the user of the recommendation system the reason for the recommendation using the sign and the value of the numerical indicator of the explanation. The sign indicates an increase (+) or decreases (-) in demand for this item. The value of the explanation indicator reflects the rate of increase or decrease in sales for a certain period of time. The disadvantage of these methods is their dependence on the choice of basic temporal rules, as well as the time interval used in the construction of the indicator of explanation. To make an informed choice of the latter, it is necessary to identify typical patterns of user group behavior. These patterns are limited to a certain time interval and consist of sequences of temporal dependencies.

The definition of such patterns will allow, first, to select the basic temporal dependencies for the construction of explanations by methods [22-24]. Secondly, the information about the duration of the pattern makes it possible to determine the intervals of detailing the time for constructing explanations.

Thus, the solution to the problem of constructing patterns of the dynamics of changing consumer interests creates the conditions for constructing explanations for recommendations for users whose interests change over time.

The article aims to develop a method of constructing patterns that reflect the dynamics of user preferences and provide an opportunity to form an explanation of the recommended list of items, taking into account changes in the requirements of the user of the recommendation system.

Construction of explanations taking into account the dynamics of changes in consumer preferences makes it possible to increase user confidence in the results of the intelligent system.

To achieve this goal the following tasks are solved:

- experimental verification of the method of constructing patterns of changing consumer preferences.

- structuring of temporal patterns of parallel-alternative and sequential-alternative choice of users of the recommendation system;

- development of a method for constructing patterns of changing user preferences using process mining technology.

The method of constructing patterns

The pattern of consumer choice dynamics reflects the typical changes in the preferences of the group of users of the recommendation system over time. It combines several sequences of selection by different users of the same subset of items.

The pattern is determined by the events set of selection $E = \{e_i\}$.

Such events are recorded by the recommendation system or e-commerce system in the form of a sales log, user action log, etc.

For each event in the log, the time of its occurrence t_i , the code of the selected item, the user code u_n , as well as the number of selected items w_i are set.

Events are ordered in time.

This ordering according to the approach proposed in [19] can be described by temporal rules of two types.

Rules of the Next type, or *X*-rules, determine the temporal order for pairs of events (e_i, e_{i+1}) when the second event occurs immediately after the first.

That is, there are no intermediate events between two choices of a referral system or e-commerce system that record other purchases of goods or services.

Rules such as Future, or *F*-rules, determine the temporal order for pairs of events (e_i, e_l) between which other events occur.

This rule specifies that an event e_i must occur after a future event e_l .

Sequential selection by users of several items is represented by a sequence of *X*-rules. If one of the users selects the first item, and then skips the selection of several items and selects the final item, its actions are described by the *F*-rule.

Because users can either sequentially select the same items at a given time interval, or select different items, their behavior is described by patterns of parallel-alternative *N1* and sequential-alternative choices *N2*.

The structure of such patterns is shown in Table 1.

Table 1 – The structure of the patterns of the dynamics of user preferences

Pattern	Alternatives	Representation by temporal rules
<i>N1</i> – parallel-alternative choice	Consistent selection of a set of several subjects or select the first and last items from the set	An <i>F</i> -type rule or a sequence of <i>X</i> -type rules
<i>N2</i> – consistently - alternative choice	Consecutive selection of several subjects, for which a parallel-alternative choice is implemented	A sequence of <i>X</i> -type rules followed by several alternatives between an <i>F</i> -type rule or a sequence of <i>X</i> -type rules

The parallel-alternative choice pattern $N1$ describes a local situation where users implement only alternative behaviors.

If the behavior of users of the recommendation system partially coincides, it is advisable to use a pattern $N2$ of a sequential -alternative choice.

The combination of these patterns makes it possible to describe the choice of several alternatives within one period of time.

The developed method of constructing patterns uses the event log of the recommendation system or e-commerce system as input data.

The method of constructing patterns consists of the following phases and stages.

Phase 1. Construction of an ordered events set for the purchase of an items subset for a given level of time granulation.

Stage 1.1. Select and organize a subset of shopping events for a given product group.

At this stage, events that reflect the work with a given group of objects A are selected from the input dataset.

The resulting dataset has the following form

$$E = \{e_i : \forall i \exists a_m \in A\}. \quad (1)$$

Each event e_i in this dataset a_m is associated with the selection of an object from a given set A .

The dataset is ordered in time, i.e. the condition is fulfilled:

$$\forall (e_i, e_{i+1}) t_i < t_{i+1}, \quad (2)$$

where t_i, t_{i+1} – moments of events occurrence e_i, e_{i+1} .

Stage 1.2. Forming a set of events for a given level of time granulation.

At this stage, events that occur e_i at a specified time interval Δt_s are combined into one event y_j . The resulting dataset Y is:

$$Y = \{y_j : \forall j \exists E_k = \{e_i, e_{i+1}, \dots : (\forall i) t_i \in \Delta t_s\}, u_n \in U\}, \quad (3)$$

where Δt_s – time detail interval, for instance a week.

The number of purchases q_j of a new event y_j is the sum of the number of purchases w_i for the incoming events e_i that generated it:

$$q_j = \sum_{i: e_i \in E_k} w_i. \quad (4)$$

Stage 1.3. Preparation of input data for intellectual analysis.

At this stage, a new ordered sequence of events is formed, which reflects X and F – the temporal relationship between the consumer's choice for a given level of time granulation.

Phase 2. Construction of patterns.

Stage 2.1. Forming a graph of changing user preferences for a given level of time detail.

At this stage, using the fuzzy miner, a graph is formed containing the patterns of the dynamics of user selection.

The task of this stage is to determine the duration of the patterns T on the basis of visual analysis of the obtained graph.

Stage 2.2. Construction of sets of temporal rules of X and F – types for a pattern $N1$.

At this stage, the rules that are part of the pattern are selected in the dataset Y using a sliding window for a duration T .

Step 2.2.1. Selection of events for the pattern $N1$.

In this step, a subset of events $Y_{k,l}^{(1)}$ on the time interval T is selected, for the elements of which the condition is fulfilled:

$$Y_{k,l}^{(1)} = \{y_k, y_j, \dots, y_l : (\forall k \forall l) \exists a_m \wedge \exists a_p, (\forall j) \exists a_m \vee \exists a_p\}, \quad (5)$$

where a_m, a_p – items from the set A .

Each of the events y_k and y_l is associated with the choice of different subjects a_m, a_p , and intermediate events y_j – with the choice of only one of these subjects. Therefore, condition (5) specifies the temporal relation F – type for extreme events y_k and y_l , and the relation X – type for intermediate events y_j . The set of such relations corresponds to the pattern $N1$.

Step 2.2.2. Formation of a set of temporal rules using the approaches presented in [20, 21].

Steps 2.2.1 and 2.2.2 repeated for all patterns in the dataset.

Stage 2.3. Construction of sets of temporal rules of X and F – types for a pattern $N2$.

At this stage, on the initial dataset Y , events and rules are selected from the pattern $N2$ using the sliding window for the duration T using the sliding window.

Step 2.3.1. Selection of events for the pattern $N2$.

In this step, a subset of events $Y_{k,l}^{(2)}$ is selected, for the elements of which the condition is fulfilled:

$$Y_{k,l}^{(2)} = \{y_k, \dots, y_{k+o}, \dots, y_j, \dots, y_l : (\forall k \forall l : k+o < j) \exists a_m \wedge \exists a_p, (\forall j) \exists a_m \vee \exists a_p\}. \quad (6)$$

where a_m, a_p – items from the set A .

Each of the events y_k, y_{k+o} is associated with the choice of different subjects a_m, a_p , and intermediate events y_j – with the choice of only one of these subjects.

Therefore, the set $y_k, \dots, y_{k+o}$ specifies the sequential, and $y_j, \dots, y_l$ – the alternative parts of the pattern $N2$.

Step 2.3.2. Formation of a set of temporal rules F – type and X – type.

Steps 2.3.1 and 2.3.2. repeated for all detected patterns $N2$.

The result of this method is a set of rules that reflect the knowledge of changes in consumer requirements for recommended goods and services over time. The received rules are intended for construction of explanations concerning recommendations.

Experimental verification of this method was performed using a set of data on wholesale sales of gifts in a supermarket chain. The choice of data set is due to the significant number of sales over short periods of time, which makes it possible to identify patterns for different levels of time detail.

The 1-day interval was selected as the base level of time detail in step 1.2.

Identifying the values of the duration of patterns and temporal rules are presented in Table 2.

Table 2 – Temporal patterns characteristics

Type of dependence	Duration, time intervals	Percentage in the dataset
X	1-2	69
F	4-5	37
N1	5	–
N2	5-6	–

According to the results of the experiment, it was found that the duration of both patterns is about 5-time intervals. X -type temporal rules in both patterns last 1-2 intervals.

F - the rules for the pattern of parallel selection are 5 intervals, and sequential-alternative - 4 intervals. The patterns have common X -type rule rules. This indicates that the duration of the pattern in 5 intervals is typical for different groups of buyers and does not depend on calendar dates.

Also from Table 2, it is seen that only 69% of X -dependencies and 37% of F -dependencies can be used to construct explanations because they are part of the obtained patterns and reflect changes in user preferences.

The percentage of patterns in the sample was not calculated because they have common rules, and the number of common rules differs for different pairs of patterns.

The conducted experimental check showed that the results of the formation of patterns can determine the duration of intervals of change of interests of consumers, and also a subset of rules which will be used for the construction of explanations.

Conclusions

The problem of constructing patterns of user's preferences dynamics the recommendation system for formation of explanations concerning the offered list of subjects is considered.

This problem arises in the case of periodic and evolutionary changes in user requirements. A method for identifying patterns of alternative and sequential-alternative choices that reflect cyclical changes in consumer preferences due to changes in the seasons of the year, in fashion trends, etc. is proposed. Patterns are based on the temporal ordering of events pairs of the type "current event - next event", "current event - next event sometime in the future". Patterns describe a parallel alternative or sequential alternative consumer choice.

Each pattern consists of many pairs of events, and each pair is ordered in time.

The parallel selection pattern contains an alternative between a sequential selection of several products or a selection of only the first and last item in the pattern. The pattern of sequential-alternative choice complements the sequence of choices of goods with the pattern of an alternative choice.

The proposed method of constructing patterns of user preferences dynamics to form explanations for the recommended list of items includes phases of constructing a set of ordered events for purchasing a selected item for a given level of time granulation, as well as constructing patterns by process mining.

The implementation of the method of constructing patterns based on the analysis of the sequence of data on the choice of items by the consumer makes it possible to form sets of time-ordered pairs of events that are part of the explanations.

Such explanations take into account the temporal dynamics of consumer preferences. Experimental verification of the method showed that the method distinguishes patterns for popular items in wholesale sales, even in the case of short datasets. The results of the method largely depend on the number of consumers who chose the target items. The sets of temporal dependences obtained as a result of the method are elements of knowledge and therefore can be used to construct explanations by probabilistic inference in the knowledge base.

Further improvement of the developed method will involve determining the weights of temporal dependences in the composition of patterns. Such weights should correspond to the probability of realization of dependence in known patterns. The conclusion on the weighted rules will allow to arrange some possible alternatives of explanations on the value of the probability of their realization and then to offer to the user of the recommendation system the most probable explanation.

REFERENCES

1. Ricci, F., Rockach, L., Shapira, B. and Kantor, P.B. (2011), *Recommender Systems Handbook*, Springer US, 842 p., DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-85820-3>

2. Cami, B.R., Hassanpour, H. and Mashayekhi, H. (2017), "A content-based movie recommender system based on temporal user preferences", *2017 3rd Iranian Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (ICSPIS)*, Shahrood, Iran, pp. 121-125, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSPIS.2017.8311601>.
3. Hernández-Rubio, M., Cantador, I. and Bellogín, A. (2019), "A comparative analysis of recommender systems based on item aspect opinions extracted from user reviews", *User Model User-Adap Inter*, 29, pp. 381-441, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11257-018-9214-9>.
4. Chala, O., Novikov, L. and Chernyshova, L. (2019), "Method for detecting shilling attacks in e-commerce systems using weighted temporal rules", *EUREKA: Physics and Engineering*, vol. 5, pp. 29-36, DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00983>.
5. Chala, O., Novikov, L. and Chernyshova, L. (2020), "Method for detecting shilling attacks in recommender systems using objective feedback", *EUREKA: Physics and Engineering*, vol. 5, pp. 21-30, DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001394>.
6. Chalyi, S., Leshchynskyi, V. and Leshchynska I. (2019), "The concept of designing explanations in the recommender systems based on the white box", *Control, navigation and communication systems*, Vol. 3 (55), pp. 156-160, DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.3.156>.
7. Adomavicius, G. and Tuzhilin, A. (2005), "Toward the next generation of recommender systems: A survey of the state-of-the-art and possible extensions", *Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 17, is. 6, pp. 734-749, DOI: <https://doi.org/10.1109/TKDE.2005.99>.
8. Zachary C.L. (2016), "The mythos of model interpretability", *Communications of the ACM*, arXiv:1606.03490, pp. 1-6.
9. Ribeiro, M.T., Singh, S. and Guestrin, C. (2016), "Why should I trust you?: Explaining the predictions of any classifier", *Proc. of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge discovery and data mining*, pp. 1135-1144, DOI: <https://doi.org/10.1145/2939672.2939778>.
10. Miller, T. (2019), "Explanation in artificial intelligence: Insights from the social sciences", *Artificial Intelligence*, vol. 267, pp.1-38, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.artint.2018.07.007>.
11. Mueller, K. (2019), "Advances in Visualization Recommender Systems", *Computer*, vol. 52, no. 8, pp. 4-5, DOI: <https://doi.org/10.1109/MC.2019.2918513>.
12. Nan, D., Yichen, W., Niao, H. and Le S. (2015), "Time-Sensitive Recommendation From Recurrent User Activities", *Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'15)*, Vol. 2, pp. 3492-3500.
13. Sun, F., Zhuang, H., Zhang, J., Wang, Z. and Zheng K. (2020), "Personalized recommendation algorithm considering time sensitivity", *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, Springer, vol. 322, pp 154-162, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-48513-9_12.
14. Kille, B., Lommatzsch, A. and Brodt T. (2015), "News Recommendation in Real-Time", *Smart Information Systems. Advances in Computer Vision and Pattern Recognition*, Springer, Cham, pp. 149-180, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-14178-7_6.
15. Chalyi, S., Leshchynskyi, V. and Leshchynska, I. (2019), "Method of forming recommendations using temporal constraints in a situation of cyclic cold start of the recommender system", *EUREKA: Physics and Engineering*, 4, pp. 34-40, DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00952>.
16. Rabi, I., Naomie, S., Aminu, D. and Akram, O. (2020), "Recommender system based on temporal models: A Systematic Review", *Applied Sciences*, Vol. 10(7), p. 2204, DOI: <https://doi.org/10.3390/app10072204>.
17. Wang, C., Min, Z., Ma, W. and Liu, Y. (2019), "Modeling item-specific temporal dynamics of repeat consumption for recommender systems", *WWW '19- The World Wide Web Conference*, pp. 1977-1987, DOI: <https://doi.org/10.1145/3308558.3313594>.
18. Chalyi, S. and Pribylnova, I. (2019), "The method of constructing recommendations online on the temporal dynamics of user interests using multilayer graph", *EUREKA: Physics and Engineering*, vol. 3, pp. 13-19, DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00894>.
19. Levykin, V. and Chala, O. (2018), "Development of a method for the probabilistic inference of sequences of a business process activities to support the business process management", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, iss. 95, pp. 16-24.
20. Chalyi, S., Leshchynskyi, V. and Leshchynska, I. (2019), "Modeling explanations for the recommended list of items based on the temporal dimension of user choice", *Control, navigation and communication systems*, Vol. 6 (58), pp. 97-101, DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.6.097>.
21. Chu, W. and Park, S.-T. (2009), "Personalized recommendation on dynamic content using predictive bilinear models", *International Conference on World Wide Web*, pp. 691-700, DOI: <https://doi.org/10.1145/1526709.1526802>.
22. Levykin, V. and Chala, O. (2018), "Method of determining weights of temporal rules in Markov logic network for building knowledge base in information control systems", *EUREKA: Physics and Engineering*, vol. 5, pp. 3-10, DOI: <http://dx.doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00713>.
23. Chalyi, S. and Leshchynskyi, V. (2020), "Method of constructing explanations for recommender systems based on the temporal dynamics of user preferences", *EUREKA: Physics and Engineering*, vol. 3, pp. 43-50, DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001228>.
24. Chalyi, S., Leshchynskyi, V. and Leshchynska, I. (2020), "Detailing explanations in the recommender system based on matching temporal knowledge", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol 4, no 2, pp. 6-13, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210013>.

Надійшла (received) 30.11.2020

Прийнята до друку (accepted for publication) 17.02.2021

Чалий Сергій Федорович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Serhii Chalyi – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Information Control Systems Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: serhii.chalyi@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9982-9091>.

Лещинський Володимир Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Volodymyr Leshchynskyi – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Software Engineering Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: volodymyr.leshchynskyi@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8690-5702>.

Побудова патернів динаміки вподобань користувачів для пояснень в рекомендаційній системі

С. Ф. Чалий, В. А. Лещинський

Анотація. Предметом вивчення в статті є процеси побудови пояснень в рекомендаційних системах. Метою є розробка методу побудови патернів, що відображають динаміку вподобань користувачів і дають можливість сформулювати пояснення щодо рекомендованого переліку предметів з урахуванням змін вимог користувача рекомендаційної системи. Побудова пояснень з урахуванням динаміки змін вподобань споживачів дає можливість підвищити довіру користувачів до результатів роботи інтелектуальної системи. **Завдання:** структуризація темпоральних патернів паралельно-альтернативного та послідовно-альтернативного вибору користувачів рекомендаційної системи; розробка методу побудови патернів зміни вподобань користувача з використанням технології process mining; експериментальна перевірка методу побудови патернів зміни вподобань споживачів. Використовуваними підходами є: темпоральні логіки, що визначають підходи до опису темпоральної упорядкованості множини подій. Отримані наступні результати. Виконано структуризацію темпоральних патернів паралельно-альтернативного та послідовно-альтернативного вибору користувачів рекомендаційної системи; розроблено та виконано експериментальну перевірку методу побудови патернів динаміки вподобань користувача. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Запропоновано метод побудови патернів динаміки вподобань користувачів для формування пояснень щодо рекомендованого переліку предметів. Метод послідовно формує множину упорядкованих подій, кожна з яких відображає вибір предмету групою користувачів на визначеному інтервалі часу, а також передбачає побудову графового представлення патернів динаміки вподобань користувачів засобами інтелектуального аналізу процесів. Патерни, отримані в результаті роботи методу, складаються із упорядкованих у часі пар подій, що відображають знання щодо зміни вподобань користувачів з часом. Подальше використання таких залежностей як елементів бази знань дає можливість на основі ймовірного виводу побудувати набір альтернативних пояснень щодо отриманої рекомендації, а потім упорядкувати ці пояснення за ймовірністю їх реалізації для рекомендованого переліку предметів.

Ключові слова: рекомендаційна система; рекомендація; пояснення; процес формування пояснень; темпоральна залежність.

Построение паттернов динамики предпочтений пользователей для объяснений в рекомендательной системе

С. Ф. Чалый, В. А. Лещинский

Аннотация. Предметом изучения в статье являются процессы построения пояснений в рекомендационных системах. Целью является разработка метода построения паттернов, которые отображают динамику предпоследний пользователей и дают возможность сформировать объяснение касательно рекомендованного перечня предметов с учетом изменений требований пользователя рекомендационной системы. Построение объяснений с учетом динамики изменений предпочтений пользователей дает возможность повысить доверие пользователей к результатам работы интеллектуальной системы. **Задачи:** структуризация темпоральных паттернов паралельно-альтернативного и последовательно-альтернативного выбора пользователей рекомендационной системы; разработка метода построения паттернов изменения предпочтений пользователя с использованием технологии process mining; экспериментальная проверка метода построения паттернов изменения предпочтений потребителей. Используемыми подходами являются: темпоральные логики, определяющие подходы к описанию темпоральной упорядоченности множества событий. Получены следующие результаты. Выполнено структурирование темпоральных паттернов паралельно-альтернативного и последовательно-альтернативного выбора пользователей рекомендательной системы; разработано и выполнено экспериментальную проверку метода построения паттернов динамики предпочтений пользователя. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов заключается в следующем. Предложен метод построения паттернов динамики предпочтений пользователей для формирования объяснений рекомендованного перечня предметов. Метод последовательно формирует множество упорядоченных событий, каждое из которых отображает выбор предмета группой пользователей на определенном интервале времени, а также предусматривает построение графового представления паттернов динамики предпочтений пользователей средствами интеллектуального анализа процессов. Паттерны, полученные в результате работы метода, состоят из упорядоченных во времени пар событий, отражающих знания по изменению предпочтений пользователей со временем. Дальнейшее использование таких зависимостей как элементов базы знаний дает возможность на основе вероятностного вывода построить набор альтернативных объяснений по полученной рекомендации, а затем упорядочить эти объяснения по вероятности их реализации для рекомендуемого перечня предметов.

Ключевые слова: рекомендационная система; рекомендация; объяснение; процесс формирования объяснений; темпоральная зависимость.

Methods of information systems protection

UDC 004.932

doi: 10.20998/2522-9052.2021.1.16

Igor Ruban, Nataliia Bolohova, Vitalii Martovytskyi, Oleh Koptsev

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

DIGITAL IMAGE AUTHENTICATION MODEL

Abstract. The development of new technologies, the growing volume of data and the total consumption of content in the digital environment are changing the ecosystem of modern media. Data can be easily and completely duplicated. It brings great convenience to life, work, scientific research and other areas of human activity. However, information security issues have appeared that have attracted a lot of attention. The purpose of this article is to present a model for digital image authentication. This article proposes a model for reliable verification of digital image authenticity with a high degree of protection and parameters for assessing the effectiveness of such systems. Reliability is achieved because the watermark is hidden not in the whole image, but in its fragment, which is most suitable for hiding the image, as well as for using anti-noise codes as a watermark. Based on the current state of watermarking methods, it is recommended to use modern algorithms and architectures of convolutional neural networks to ensure a high degree of security.

Keywords: digital watermark; authentication; copyright; digital image authentication model; steganographic; cyber-security.

Introduction

The development of new technologies, the growing volume of data and the total consumption of content in the digital environment are changing the ecosystem of modern media. Data can be easily and completely duplicated. It brings great convenience to life, work, scientific research and other areas of human activity. However, information security issues have appeared that have attracted a lot of attention. Copyright ownership is an important aspect of information security, and the use of digital watermarks is an effective way to protect copyrights [1]. Copyright protection is achieved by embedding author information into the digital content. In recent years, many watermarking algorithms have been proposed [1-10].

The Internet is a free zone, where almost everything is open and everything is allowed. The Internet makes it easy to copy and replicate any pictures, texts, video and audio product, without thinking about the fact that these pictures, articles, songs have authors who have certain rights to this multimedia data.

Almost every site in the Internet contains photos and illustrations. At the same time, most of the images posted on the Internet are used without a valid license – unfortunately to authors.

To raise awareness of the extent of image copyright infringement, Copytrack regularly investigates how, where and to what extent images are used illegally. Copytrack's 2019 Global Infringement Report consists of a statistical analysis of more than 12,000 Copytrack user profiles. Investigation of Illegal image using was based on all searches deemed illegal by individual account holders, and on website owner data based on information gathered by internal search robots. The percentages mentioned in this report refer to the number of potential copyright infringements handled by Copytrack between December 2017 and December 2018. Geographic locations were used for the analysis.

According to the 2019 Copytrack Global Infringement Report [11], Fig. 1 shows the percentage of copyright infringement in the use of images on the global In-

ternet.

According to the report [11], more than 2.5 billion images are stolen every day. These license violations can lead to daily damages of up to 532.5 billion euros.

The purpose of this article is to present a model for digital image authentication.

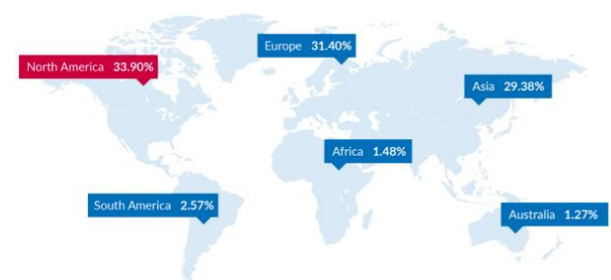


Fig. 1. Copyright Infringement Statistics by Continent [11]

Analysis of publications

A digital watermark is a special mark embedded in digital content (called a container) to protect copyrights and confirm the integrity of the document itself. A watermark can be embedded in any type of electronic document. Along with various images (photos, drawings, scanned paper documents, etc.) there are audio recordings that contain a watermark, and video (e.g., DVDs). Watermarks is actively used for placement of unique photos, videos, audio tracks in electronic form on the global Internet.

There are different methods of classification of watermarks algorithms creation. If we divide them by characteristics, there are three types of digital watermarks:

- stable (robust), such watermarks should be resistant to any influences on them [12];
- fragile, changing or collapsing with minor modification of the container [13];
- semi-fragile, resistant to some influences and unstable to others [13].

Resistant watermarks are used when it is necessary to remain the identification code, company logo and other identifiers intact with maximum distortion of the contain-

er. Fragile watermarks and electronic digital signatures are used to verify the integrity of electronic documents. Algorithms of embedding fragile watermarks are especially sensitive to any distortion and effective for integrity control and forgery protection. In the case of semi-fragile TLDs, an image, for example, can be converted to another format or compressed, but you cannot cut or paste a fragment into it; for an audio track, the sound frequencies can be changed, but the performer's voice cannot be removed.

Most of the current research focuses on a robust watermarking algorithm for copyright protection, such an algorithm usually embeds the watermark in the transform region of the image to improve reliability. Discrete Fourier transform (DFT), discrete wavelet transform (DWT) and discrete cosine transform (DCT) are the most commonly used basic transformation methods [1-3, 6].

The article [4] proposes a new method for watermarking a color image in the spatial domain for fast and efficient color image copyright protection. It discusses the direct propagation coefficient (DC) 2D-DFT, obtained in the spatial domain. Also it proves connection between the change of each pixel in the spatial domain and in the DC coefficient in the Fourier transform.

The article [5] proposes a new technique for watermarking medical images to detect damaged areas in medical images with greater accuracy by authenticating 4×4 blocks and without limiting the region of interest (ROI) size. The proposed method can label a 4×4 pixel block if it has at least one distorted pixel, while similar methods (which have no region of interest size limitation) label 8×8 , 16×16 , and 40×40 pixel blocks.

The article [7] proposed a reliable method for watermarking an image in a merged wavelet transform (LWT) domain. The neural network is included in the watermark extraction process to increase resistance to various attacks. The integration of the neural network with LWT makes the system resistant to various attacks, while maintaining an adequate level of stealth.

Since a reliable watermarking algorithm also has high security requirements, the article proposes a general model for image copyright protection based on LWT.

Digital Image Authentication Model

Model of digital image authentication can be considered as steganographic system that transmits an encrypted identifier, which is a digital watermark.

After analyzing of the current state of research on methods of superimposition of watermark and significant parameters of watermark, we can form the following assessment of the system of digital image authentication effectiveness:

$$EF = R \cdot \alpha_r + SR \cdot \alpha_{sr} + ER \cdot \alpha_{er} + SC \cdot \alpha_{sc} + DT \cdot \alpha_{dt}, \quad (1)$$

where $R, R \in [0,1]$ – is an estimate of the reliability of the method of embedding a watermark;

$RS, RS \in [0,1]$ – is an estimate of the watermark invisibility in the image;

$ER, ER \in [0,1]$ – is the probability of an error of the first and second kind;

$SC, SC \in [0,1]$ – is an estimate of the fragility of the watermark;

DT – is the number of embedded watermarks;

$\alpha_r, \alpha_{sr}, \alpha_{er}, \alpha_{sc}, \alpha_{dt}$ – are significance coefficients of the corresponding parameters of the watermark method. Such coefficients are necessary because there is no universal watermark embedding method, so thanks to such coefficients you can adjust the significance of each parameter and thus influence the final effectiveness of the method for a particular watermarking task.

The process of digital image authentication with watermark is shown in Fig. 2 and consists of the following main steps:

- 1) defining the area for embedding;
 - 2) generating a watermark;
 - 3) embedding the watermark in an image fragment;
 - 4) image preprocessing after embedding the watermarked fragment in the original image;
 - 5) detecting the watermarked fragment;
 - 6) extraction of the watermark from the fragment;
 - 7) correcting errors in the watermark during extraction;
 - 8) obtaining the label of the right holder.
- Consider these steps.

Step 1 - Definition of the area for embedding.

Suppose there is an image Im $[N, M]$ in which you want to embed a watermark $W[k, l]$.

Then, in the simplest case, the procedure for determining the optimal area for embedding a watermark can be represented using the sliding window method.

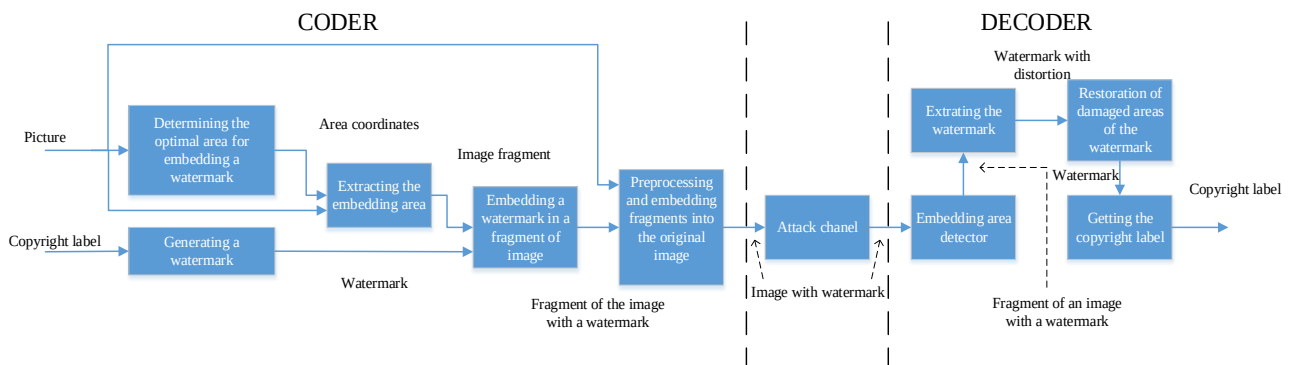


Fig. 2. Digital Image Authentication Model

The scheme of the algorithm for determining the area for embedding is shown in Fig. 3. Analytically, the sliding window processing can be represented as follows:

$$E(Im_{i,j}) = Q|q(Im_{i,j}), q(Im_{i,j+1}), q(Im_{i,j-1}), \dots| = Q|q(Im_{i+k}, Im_{j+l})| \langle k, l \rangle \in S, \quad (2)$$

where $E(Im_{i,j})$ – the optimality value of the embedding area; Q – function describing the rules for evaluating the pixels in the vicinity S ; S – point vicinity, the set of points (pixels) surrounding the working point (usually the center pixel); k, l – the size of the sliding window, given by the S set of coordinate offsets on the abscissa axis and the ordinate axis, respectively.

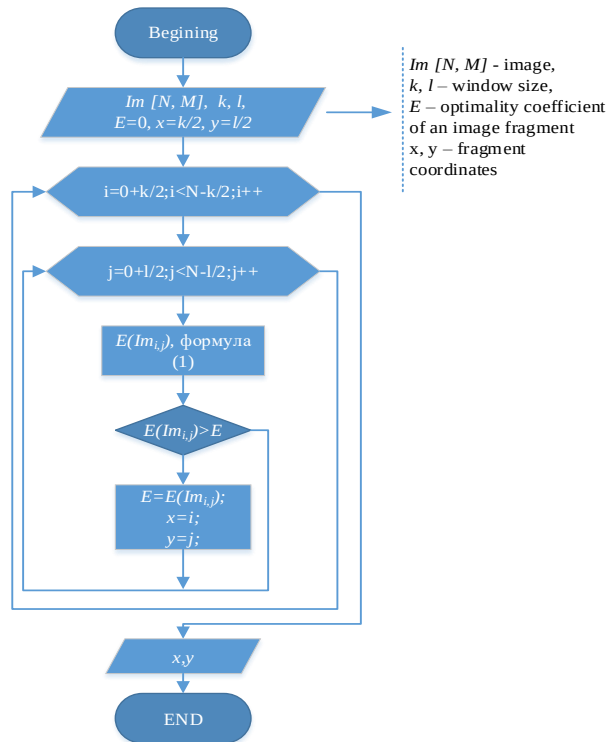


Fig. 3. Diagram of the algorithm for determining the area for embedding

Stage 2 - Generation of the watermark.

Let W', I', K', B' be the set of possible watermarks, containers (the form of watermark representation) of keys and hidden identifiers of right holders, respectively. Then the generation of the watermark can be represented as:

$$F: I' \times K' \times B' \rightarrow W, W = F(I, K, B), \quad (2)$$

where W, I, K, B – are elements of the corresponding sets. Generally speaking, the function can be arbitrary, but in practice, the robustness requirements of the watermark impose certain restrictions on it. Thus, in most cases, $F(I, K, B) \approx F(I + \varepsilon, K, B)$, i.e., a slight change in the container does not change the hidden IDs of the rights holders. The function is usually composite:

$$F = T \circ G, \text{ where } G: K' \times B' \rightarrow C' \text{ and } T: C' \times I' \rightarrow W' \quad (3)$$

that is, the watermark depends on the properties of the container. The function G can be implemented using a cryptographically secure pseudorandom number generator with K as the initial value.

To improve the robustness of the watermark, authors use interference-resistant codes such as BCH codes, convolutional codes. [14, 15].

The operator T modifies the code words C' , resulting in a watermark W' . It is possible not to impose irreversibility constraints on this function since the appropriate choice G already guarantees irreversibility F . The function T must be chosen such that an unfilled container I_0 , a filled container I_W and a slightly modified filled container I_W'' would produce the same watermark:

$$T(C, I_0) = T(C, I_W) = T(C, I_W''), \quad (4)$$

Step 3 - Generation of the watermark.

The process of embedding the watermark $W(i, j)$ in the original image $I_0(i, j)$ can generally be described as a superposition of two signals:

$$\varepsilon: I' \times W' \times L' \rightarrow I_W, I_W(i, j) = I_0(i, j) \oplus L(i, j)W(i, j)p(i, j), \quad (5)$$

where $L(i, j)$ – watermark-embedding mask, which takes into account the characteristics of the human visual system, serves to reduce the visibility of the watermark; $p(i, j)$ – projecting function;

Sign $\oplus$ denotes the superposition operator, including, addition, truncation, and quantization.

The projecting function carries out the "distribution" of the watermark over the image area. Using of it can be considered as an implementation of parallel channel information spacing. In addition, this function has a certain spatial structure and correlation properties used to counteract geometric attacks.

Step 4 - Image preprocessing after embedding the watermarked fragment in the original image.

At this stage, the image fragment I_W is inserted into the original image Im . Since I_W is a modification of the original fragment I_0 , which serves as a container for the watermark. When embedding it into the original image Im , the watermarked fragment will differ from the general distribution of the image brightness $I_0(i, j) + \alpha$, where α is a modification factor that occurs during the embedding process. To eliminate this drawback, after embedding a fragment with a watermark in the original image, anti-aliasing is applied along the edges of the embedded fragment to eliminate the visibility of the presence of a watermark in the image.

Step 5 - Detect the watermarked fragment.

The task of detection is to find objects (watermark) with certain properties on the image, and if the objects are

detected, to determine their coordinates on the image plane. The basic principle of object detection on the image is to compare the brightness function of the image with some "reference" - a fragment of the brightness field containing the desired object. When implementing the detection procedure, the standard is sequentially moved along the image field, and at each position, its similarity to the real brightness function on the fragment is investigated. Complete coincidence of the standard and the image, as a rule, does not happen due to noise and distortion, as well as because usually there is no complete information about the shape and structure of the object, (we have to use the standard, only approximately describing the object).

Since watermarks are hidden and different in structure in the image in such a way that they are less visible, it is best to use neural networks for detection and localization.

Step 6 - Extracting the watermark from the fragment. The extraction uses the inverse of the operation in step 3 and depends on the embedding method.

Step 7 - Correcting errors in the watermark during extraction. Since it is recommended to use interference-resistant codes, such as BCH codes, convolutional codes, to improve robustness, this step is the correction of distortions in the watermark.

Step 8 - Obtaining the label of the copyright holder. This step is the reverse of step 2 and depends on the method used to generate the watermark.

There is a probability that the decoder will not detect an existing watermark and a probability of falsely finding a watermark in an empty container (false alarm probability). Decreasing one probability leads to increasing the other probability.

Reliability of the decoder is characterized by the probability of false detection. This model for verifying the authenticity of a digital image is designed to minimize the likelihood of both errors, since each of them can lead to denial of service.

Conclusion

This article proposes a model for reliable verification of digital image authenticity with a high degree of protection and parameters for assessing the effectiveness of such systems. Reliability is achieved because the watermark is hidden not in the whole image, but in its fragment, which is most suitable for hiding the image, as well as for using anti-noise codes as a watermark. Based on the current state of watermarking methods, it is recommended to use modern algorithms and architectures of convolutional neural networks to ensure a high degree of security.

REFERENCES

1. Su, Q. (2016), "Novel blind colour image watermarking technique using Hessenberg de-composition", *IET Image Process*, pp. 817–829, DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2018.6040>.
2. Zhang, X., Peng, F. and Long, M. (2018), "Robust Coverless Image Steganography Based on DCT and LDA Topic Classification", *IEEE Trans. on Multimedia*, Vol. 20, No. 12, pp. 3223-3238, DOI: <https://doi.org/10.1109/TMM.2018.2838334>.
3. Choudhary, R. and Parmar, G. (2016), "A robust image watermarking technique using 2-level discrete wavelet transform (DWT)", *2nd International Conference on Communication Control and Intelligent Systems (CCIS)*, pp. 120-124, DOI: <https://doi.org/10.1109/CCIS.2016.7878213>.
4. Su, Q. (2019), "New Rapid and Robust Color Image Watermarking Technique in Spatial Domain", *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 30398-30409, DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2895062>.
5. Ustubioglu, A. and Ulutas, G. (2017), "A New Medical Image Watermarking Technique with Finer Tamper Localization", *J. Digit Imaging* 30, pp. 665-680, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10278-017-9960-y>.
6. Hamidi, M., Haziti, M.E. and Cherifi, H. (2018), "Hybrid blind robust image watermarking technique based on DFT-DCT and Arnold transform", *Multimed Tools Appl* 77, pp. 27181-27214, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-018-5913-9>.
7. Islam, Mohiul, Amarjit, Roy, and Rabul Hussain, Laskar (2018), "Neural network based robust image watermarking technique in LWT domain", *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, Vol. 34.3, pp. 1691-1700, DOI: <https://doi.org/10.3233/JIFS-169462>.
8. Kumar, Shishir, Neha, Jain, and Steven Lawrence, Fernandes (2017), "Rough set based effective technique of image watermarking", *Journal of Computational Science*, Vol. 19, pp. 121-137, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2016.11.009>.
9. Parah, S.A., Sheikh, J.A. and Loan, N.A. (2018), "Utilizing neighborhood coefficient correlation: a new image watermarking technique robust to singular and hybrid attacks", *Multidim Syst Sign Process*, Vol. 29, pp. 1095-1117, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11045-017-0490-z>.
10. Munib, Summuyya, and Asifullah, Khan (2017), "Robust image watermarking technique using triangular regions and Zernike moments for quantization based embedding", *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 76.6, pp. 8695-8710, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-016-3485-0>.
11. (2019), *Copytrack Global Infringement Report 2019*, International Image Theft in Comparison, available at: https://www.copytrack.com/wp-content/uploads/2019/04/190328_Global_Infringement_Report_2019_EN_Online.pdf.
12. A. Ramsha, M. Mohsin Riaz, and A. Ghafoor (2018), "Attack resistant watermarking technique based on fast curvelet transform and Robust Principal Component Analysis", *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 77, No. 8, pp. 9443-9453, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-017-5128-5>.
13. Shehab, Abdulaziz, et al. (2018), "Secure and robust fragile watermarking scheme for medical images", *IEEE Access*, Issue 6, pp. 10269-10278, DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2799240>.
14. Yarmolik, V.N., Portyanko, S.S. and Yarmolik S.V. (2007), *Kriptografiya, steganografiya i ohrana avtorskogo prava*, monografiya, BGU, Minsk, 240 p.
15. Gribunin, V.G., Okov, I.N. and Turintsev I.V. (2002), *Tsifrovaya steganografiya. Aspekty zaschityi*, Solon-Press, Moscow, 272 p.

Надійшла (received) 23.11.2020

Прийнята до друку (accepted for publication) 10.02.2021

Рубан Ігор Вікторович – доктор технічних наук, професор, перший проректор, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Igor Ruban – Doctor of Technical Sciences, Professor, The first vice-rector, 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, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Nataliia Bolohova – Postgraduate student, 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 обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

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

e-mail: vitalii.martovytskyi@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2349-0578>.

Копцев Олег Олегович – студент, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Oleh Koptsev – student, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: oleh.koptsev@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4426-057893>.

Модель аутентифікації цифрових зображень

І. В. Рубан, Н. М. Бологова, В. О. Мартовицький, О. О. Копцев

Анотація. Розвиток нових технологій, зростання обсягів великих даних і тотальне споживання контенту в цифровому середовищі змінюють екосистему сучасних медіа. Дані можна легко і повністю дублювати, що приносить велику зручність в житті, роботі, наукових дослідженнях та інших сферах діяльності людини. Однак виникли питання інформаційної безпеки, які привернули велику увагу. Право власності на авторські права - важливий аспект інформаційної безпеки, а використання цифрових водяних знаків - ефективний спосіб захисту авторських прав. **Метою даної статті** є представлення моделі перевірки справжності право власності на авторські права зображення. Цифрові водяні знаки (ЦВЗ) активно використовуються при розміщенні унікальних фотографій, відео, аудіотреків в електронному вигляді в глобальній мережі Інтернет. Оскільки надійний алгоритм водяних знаків також має високі вимоги до безпеки, в роботі запропонована загальна модель перевірки автентичності зображення на основі ЦВЗ. Модель перевірки справжності цифрового зображення може бути розглянута як стеганографічна система, в якій передається інтегрований зашифрований ідентифікатор в область зображення є цифровим водяним знаком. Існує ймовірність того, що декодер не виявить наявний ЦВЗ і ймовірність помилкового знаходження ЦВЗ в порожньому контейнері (ймовірність помилкової тривоги). Зниження однієї ймовірності призводить до збільшення іншої. Надійність роботи декодера характеризують ймовірністю помилкового виявлення. Дана модель перевірки справжності цифрового зображення побудована таким чином, щоб мінімізувати ймовірність виникнення обох помилок, так як кожна з них може привести до відмови від обслуговування. У цій статті пропонується модель надійної перевірки автентичності цифрового зображення з високим ступенем захисту і параметри оцінки ефективності роботи подібних систем. Надійність досягати за рахунок того, що ЦВЗ ховається не в усьому зображенні, а в його фрагменті, який найбільш підходить для приховування ЦВЗ, а також застосування в якості ЦВЗ перешкодостійких кодів. Спираючись на поточний стан методів ЦВЗ для забезпечення високого ступеня захищеності рекомендується застосовувати сучасні алгоритми і архітектури згортальних нейронних мереж.

Ключові слова: цифровий водяний знак; автентифікація; авторське право; модель аутентифікації цифрових зображень; стеганографія; кібербезпека.

Модель проверки подлинности цифрового изображения

И. В. Рубан, Н. М. Бологова, В. А. Мартовицкий, О. О. Копцев

Аннотация. Развитие новых технологий, растущие объемы больших данных и тотальное потребление контента в цифровой среде меняют экосистему современных медиа. Данные можно легко и полностью дублировать, что приносит большое удобство в жизнь, работу, научные исследования и другие сферы деятельности человека. Однако возникли вопросы информационной безопасности, которые привлекли большое внимание. **Целью данной статьи** является представление модели проверки подлинности цифрового изображения. Цифровые водяные знаки (ЦВЗ) активно используются при размещении уникальных фотографий, видео, аудиотреков в электронном виде в глобальной сети Интернет. Поскольку надежный алгоритм водяных знаков также предъявляет высокие требования к безопасности, в работе предложена общая модель проверки подлинности изображения на основе ЦВЗ. Модель проверки подлинности цифрового изображения может быть рассмотрена как стеганографическая система, в которой передается интегрированный зашифрованный идентификатор в область изображения цифровым водяным знаком. Снижение одной вероятности приводит к увеличению другой. Надежность работы декодера характеризуют вероятностью ложного обнаружения. Данная модель проверки подлинности цифрового изображения построена таким образом, чтобы минимизировать вероятность возникновения обеих ошибок, так как каждая из них может привести к отказу от обслуживания. В этой статье предлагается модель надежной проверки подлинности цифрового изображения с высокой степенью защиты и параметры оценки эффективности работы подобных систем. Надежность достигается за счет того, что ЦВЗ скрывается не во всем изображении, а в его фрагменте, который наиболее подходит для скрытия изображения, а также применения в качестве ЦВЗ помехоустойчивых кодов. Опираясь на текущее состояние методов ЦВЗ для обеспечения высокой степени защищенности рекомендуется применять современные алгоритмы и архитектуры сверточных нейронных сетей.

Ключевые слова: цифровой водяной знак; аутентификация; авторское право; модель аутентификации цифрового изображения; стеганография; кибербезопасность.

Galina Cherneva^{1,2}, Pavlo Khalimov³

¹South West University, Blagoevgrad, Bulgaria

²“Todor Kableshkov” University of Transport, Sofia, Bulgaria

³National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

MUTATION TESTING OF ACCESS CONTROL POLICIES

Abstract. One of the most important and integral components of modern computer security are access control systems. The objective of an access control system (ACS) is often described in terms of protecting system resources against inappropriate or unwanted user access. However, a large degree of sharing can interfere with the protection of resources, so a sufficiently detailed AC policy should allow selective exchange of information when, in its absence, sharing can be considered too risky in general. Erroneous configurations, faulty policies, as well as flaws in the implementation of software can lead to global insecurity. Identifying the differences between policy specifications and their intended functions is crucial because the correct implementation and enforcement of the policies of a particular application is based on the premise that the specifications of this policy are correct. As a result of the policy, the specifications presented by the models must undergo rigorous validation and legalization through systematic checks and tests to ensure that the specifications of the policies really correspond to the wishes of the creators. Verifying that access control policies and models are consistent is not a trivial and critical task. And one of the important aspects of such a check is a formal check for inconsistency and incompleteness of the model, and the security requirements of the policy, because the access control model and its implementation do not necessarily express policies that can also be hidden, embedded by mixing with direct access restrictions or another access control model.

Keywords: access control; access control system; mutation testing; access control testing; policy.

Introduction

The main purpose of an access control system is often described as: protecting system resources against inappropriate or unwanted user access. From a business point of view, the goal can also be described by the optimal exchange of information for users and the program. However, much of the sharing can interfere with resource protection. Thus, detailed access control policy should allow for the selective exchange of information when, in its absence, sharing may be considered excessively dangerous.

Proper implementation and usage of access control policies are based on the premise that policies and specifications are true without hidden or conflicting rules that cause leakage or block access to information objects. Access control policy specifications should be thoroughly reviewed and legalized through continuous testing to ensure that policy specifications do reflect policy maker trends. Verification and testing of access control policies are similar to general testing of application software in many respects, but there are also differences. To nominally and accurately capture the security requirements that an access control system must adhere to, in this case models should be created in order to bridge a large gap in the abstraction between policy and mechanism.

Thus, information for development and implementation, as well as unambiguous and exact expression are provided by the access control model.

1. Access Control Policies

Access Control Policies — are high-level requirements that define how and by whom access is managed, under what circumstances they can access specific information. While access control policies may be program-oriented and thus taken to attention by the program provider, policies may relate to user actions

within an organizational unit or across organizational boundaries. For example, policies may relate to the use of resources within or between organizational units or may be based on factors requiring knowledge, competence, authority, commitment or conflict of interest. Such policies may cover several computing platforms and programs. It is impractical to create a list of common access management policies, as business objectives, risk tolerance, corporate culture and regulatory responsibilities that affect policy vary from enterprise to enterprise and even from one organizational unit to another.

There are several well-known access control policies that can be categorized: discretionary or non-discretionary. Typically, discretionary access control policies are associated with identifier-based access control, and non-discretionary access control policies are associated with rule-based controls (e.g., a Mandatory access control).[1].

2. Discretionary access control

Discretionary access control delegates a certain part of access control at the discretion of the owner of the object, or any other person authorized to control access to the object. For example, it is typically used to restrict another user's access to a file (it is the file owner that controls other users' access to this file). Only those users specified by the owner can have some combination of read, write, execute, and other file permissions. Policy of discretionary access control, usually very flexible and widely used in the commercial and public sectors. However, discretionary access control is known to be considered vulnerable for two reasons: First, granting read access is transient. For example, when user "A" gives user "B" read access to a file, nothing stops user "B" from copying the contents of user "A's" file. Copying performs to the object controlled by user "B". User "B" can now grant any

other user access to a copy of user file "A" behind the back of user "A". Also, discretionary access control policies are vulnerable to various Trojan attacks. Because programs inherit the identity of the user who calls them, for example user "B" can write a program for user "A" which at first look performs some useful functions and at the same time can destroy the contents of files which belongs to user "A". During investigation of a problem, the audit files will indicate that user "A" has destroyed his own files [2]. Thus, formally, the disadvantages of discretionary access control are as follows:

- Information can be copied from one object to another; so there is no real guarantee in the flow of information in the system.
- There are no restrictions on the use of information when the user receives it.
- Access rights to objects are determined by the owner of the object, not through a system-wide policy that reflects the security requirements of the organization.

3. Testing of discretionary access control

For now, there are several basic methods of testing for accessibility to architecture: black box testing, white box testing, and gray box testing. Black box testing — this testing evaluates the functionality of the model without knowledge of its internal work. Testing by the white box method, is opposite of the black box testing and tests the internal functionality [3]. Gray box testing is a test that is performed with general knowledge of the model, usually performed by the user or the entity that simulates the user. Black box testing methods (or behavioral testing) may not be sufficient to protect against some spontaneous actions that are built into the access control model.

The methods of white box testing include the following testing tools:

- Error guessing;
- Error seeding;
- Exhaustive testing.

Error guessing - is a testing method where tests are developed based on the experience of previous testing or on the knowledge and experience of the tester, which defects are typical for certain components of the model or for functional areas. This method can also be applied to black box testing. Often the method is used in conjunction with other testing tools. The main advantage of this method is that this method reveals the cons of the system or model that cannot be detected by formal testing tools, but the effectiveness of the method is directly proportional to the experience of the tester or the experience of past testing, and does not guarantee high coverage.

Error seeding - is the process of deliberately entering errors into a program to test whether test cases are able to record added errors. This technique aims to detect errors in order to determine the relationship between actual and artificial errors. Artificial errors are unknown errors, and actual errors are injection errors, so test cases are used to check for such faults. This is basically an evaluation technique that helps to

determine the presence of real errors based on the number of sown errors found. The main disadvantage of this method is the need to remove errors from the model after testing, which in turn complicates the automation of model testing.

Exhaustive testing, also known as complete testing, it is the complete testing of all system components with all possible combinations of input and output data. This method has a high code coverage ratio, but requires significant computing resources and time. The more complex the system, the more resources are required. In practice, it is used to test simple components of the model [4]. To solve the problem of automation, resources, and high coverage, consider mutation testing of the white box method, which generates additional test inputs to cover policy-related objects. The following example shows a mutation check for safety requirements. This policy formalizes the university's access control model for assigning and obtaining grades. It has two subjects: faculty and student, as well as two resources: credit scores and exam grades, and three actions: assign, review, and obtain. For this example, we expect the following requirements:

S1 — There are no students who have the rights to assign exam grades.

S2 — All faculty members have rights to assign credit and exam grades.

S3 — There is no such combination of subjects that the user with these subjects has the right to obtain and assign a resource examination marks.

The first security requirement S1 is intuitive, as we certainly don't want students to assign grades. The second safety requirement S2 is to ensure that teachers can actually assign grades. S3 is an example of segregation of duties, as we do not want anyone to assign their grades. There is an obvious conflict of interest. The following is an example of an access control policy model. To make the example readable and concise, the Model is written as simple statements. Are there requirements that do not immediately meet these three requirements. Requirements are, in essence, a constraint on the division of responsibilities that controls any request from both teaching and student subjects. All three safety requirements are met in the model. The first step in validating a mutation is to create mutation models using a mutation operator that simply inverts the effect of each rule by changing the permission to prohibit or the permission to allow. The number of mutant models created by this operator is equal to the number of rules in the model. The example model has only two rules [5] (Fig. 1 – Fig. 3).

The second step of verification is to determine what safety requirements are contained in the original model and each model of the mutant. The mutation model is excluded at the safety requirement if the safety requirement is maintained for the original model, but not for the mutant model. In other words, the safety requirement reveals a defect inherent in the mutation model. The greater the number of mutant models excluded, the more the original model meets safety requirements.

1. if object = faculty
2. and resource = (credits or exam grades)
3. and action = (view a6o assign)
4. then
5. allow
6. if object = student
7. and resource = or exam grades
8. and action = obtain
9. then
10. allow

Fig. 1. Requirements of access control model

1. if object = faculty
2. and resource = (credits or exam grades)
3. and action = (view a6o assign)
4. then
5. prohibit
6. if object = student
7. and resource = or exam grades
8. and action = obtain
9. then
10. allow

Fig. 2. First mutant of model

1. if object = faculty
2. and resource = (credits or exam grades)
3. and action = (view a6o assign)
4. then
5. allow
6. if object = student
7. and resource = or exam grades
8. and action = obtain
9. then
10. prohibit

Fig. 3. Second mutant of model

The first mutation model in Figure 2 does not meet the requirement of S2, and thus the first model is excluded. Requirement S2 seeks to provide a policy under which all teachers can assign grades. Because the error in the model is the rule that provides such access, the security requirement is violated. The second model of the mutant in Figure 3 is not excluded by any of the three safety requirements, showing that the original model is not comprehensive and does not fully meet the safety requirements. Mutation testing serves a safety requirement for two purposes: to determine whether the model fully covers the safety requirements to facilitate changes to the model so that it covers all safety requirements or vice versa. In some cases, instead of correcting the model, mutation testing serves to correct the security requirement by correcting the policy:

S4 — All students can obtain exam grades.

4. Discussion of results

Summarizing, Fig. 4 illustrates the required inputs and outputs of the mutation test. The input data is a tested model and, in this case, one mutation operator. The mutator then generates a set of mutant models, each of which has one error. The mutation operator generates a mutant for each rule, denying the decision of this rule. Although black box testing is relatively quick for mutants, large models can use thousands of mutant models to easily generate them. An equivalent mutant is a mutant that is syntactically different from the original model, being semantically equivalent.

In other words, an equivalent mutant will give the same result as the original model for all input data and thus does not give any benefit and result in artificially reducing the killing rate of mutants, which gives low quality and inaccurate measurement quality. It is also possible to determine which safety requirements are met and which do not correspond to both the original model and each model of the mutant [6].

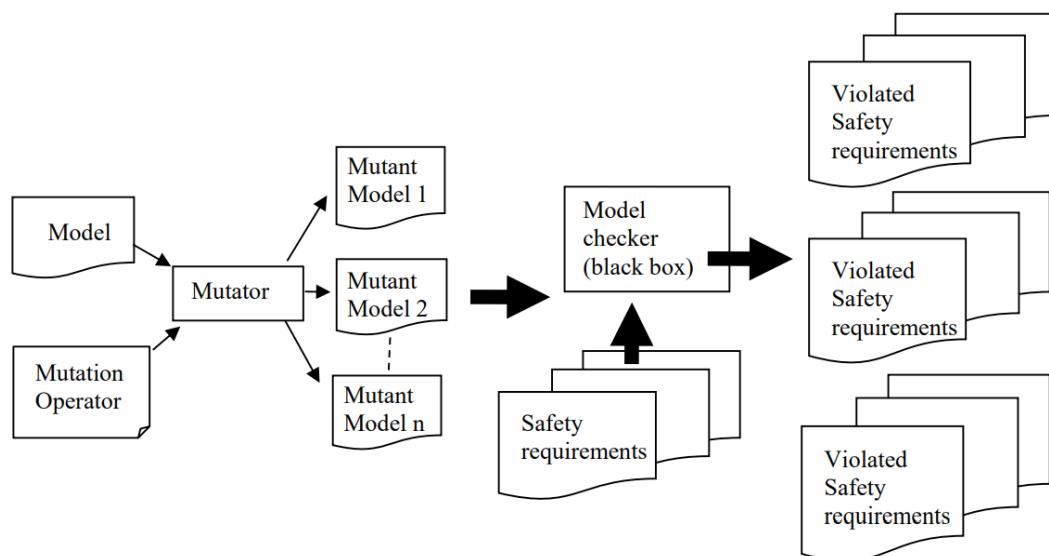


Fig. 4. Mutant models generation

An important step in mutation testing is to calculate the exclusion factor for mutation models.

The model exclusion factor is the ratio of the number of excluded models to the total number of

mutation models. This ratio serves as a metric to quantify the coverage of the safety requirements of the model. The high exclusion factor indicates that the original model covers a large number of safety requirements. For example, the coverage of the models (i.e. the model exclusion factor) for the security requirements S1, S2 and S3 in the above example is 50%, because only one of the two models is excluded. If

you add S4, then the exclusion factor will increase to 100%.

There are trace files, which were previously generated by security requirements verification, are analyzed in order to divide the security requirement into four subsets for each mutant. The Venn diagram is illustrated in Fig. 5, which describes the relationship of these four sets for one mutant model.

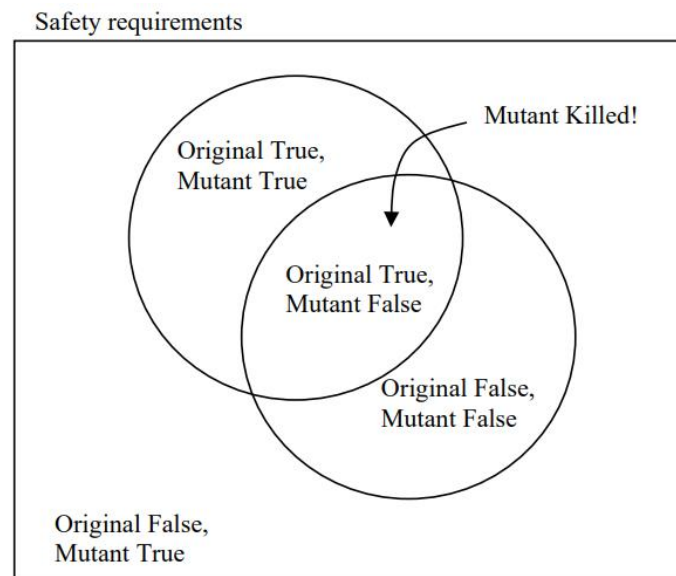


Fig. 5. Venn diagram illustrating the four safety requirement states

The area inside the box presents a set of all safety requirements. The area inside the left circle is a set of safety requirements that are true for the original model.

Thus, the area outside the smallest left circle and inside the field is a set of security requirements that do not correspond to the reality for the original model (i.e. these security requirements do not meet the requirements of the original model).

The area inside and the right circle represent a mutant model that is considered erroneous for safety requirements. Therefore, the area outside the right side of the circle and inside the box is a set of safety requirements that are true for the mutant model. An interesting area is the intersection between the two circles. If at least one safety requirement adheres to the original model, but it is not met fairly for the mutant model, then the mutant is killed. If two circles do not intersect, the mutant is not killed [7].

A safety requirement that is true for both the original model and the mutant model is irrelevant to the detection of a fault in the mutant model because the safety requirement does not apply to the part of the

model that contains the defect. The security requirement that is considered erroneous for the original model does not matter, as it is unclear whether this erroneous security requirement is caused by an error in the model or the security requirement itself.

More specifically, before performing a mutation testing, these safety requirements must be checked manually to determine whether they are erroneous due to a model error, a safety requirement error, or an error in environmental constraints.

Conclusion

Therefore, mutation testing, in contrast to exhaustive testing, can be implemented for any complexity with a sufficiently high code coverage ratio.

Since additional mutant models are created based on the base model, and all tests are performed on the mutants, this guarantees the integrity of the base model, and also provides an opportunity to automate testing.

Thus, the mutation testing method can be used to test access control policies.

REFERENCES

1. Hu, V.C., Ferraiolo, D.F. and Kuhn, D.R. (2006), *Assessment of Access Control Systems*, NIST Interagency Report 7316, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.7316>.
2. Muhammad, Aqib and Riaz Ahmed, Shaikh (2015), "Analysis and Comparison of Access Control Policies Validation Mechanisms", *International Journal of Computer Network and Information Security (IJCNIS)*, Vol. 1, pp. 54-69. DOI: <https://doi.org/10.5815/ijcnis.2015.01.08>.
3. Hu, V.C., Kuhn, D.R. and Xie, T. (2008), "Property Verification for Generic Access Control Models", *Proceeding of The 2008 IEEE/IFIP International Symposium on Trust, Security and Privacy for Pervasive Application (TSP2008)*, Shanghai, China, December 17-20, DOI: <https://doi.org/10.1109/EUC.2008.22>.

4. Brian, L.K., Labish, Yu. and Shusha, M. (2005), "Stress Testing of Real Time Systems with Genetic Algorithms," *Proceedings of the 7th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computing*, pp. 1021-1028, Washington, DC, USA.
5. Hu, Vincent C., Kuhn, Rick and Yaga, Dylan (2017), *Verification and Test Methods for Access Control Policies/Models*, NIST Special Publication 800-192, DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-192>.
6. Martin, E. and Xie, T. (2007), "A Fault Model and Mutation Testing of Access Control Policies", *Proceedings of the 16th International Conference on World Wide Web (WWW 2007), Security, Privacy, Reliability, and Ethics Track*, Banff, Alberta, Canada, pp. 667-676, DOI: <https://doi.org/10.1145/1242572.1242663>.
7. Jia, Yu. and Harman, M. (2011), "Analysis and Investigation of the Development of Mutation Testing", *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 37, issue 6, pp. 649–678.

Надійшла (received) 30.11.2020

Прийнята до друку (accepted for publication) 10.02.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Чернева Галіна Петкова – доктор наук (комунікаційні технології), професор, Транспортний університет "Тодор Каблешков", Софія, Південно-Західний Університет, Благоевград, Болгарія;

Galina Cherneva – Doctor of Sciences, (Communication Technology), Professor, "Todor Kableshkov" University of Transport, Sofia, South West University Blagoevgrad, Bulgaria;

e-mail: cherneva@vtu.bg, gcherneva@swu.bg; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7441-0270>.

Халімов Павло Вікторович – аспірант кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Pavlo Khalimov – Postgraduate student Professor of Computer Science and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: pavlo_khalimov@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0254-5015>.

Мутаційне тестування політик керування доступом

Г. П. Чернева, П. В. Халімов

Анотація: Одними з найскладніших, важливих та невід'ємних складових сучасної комп'ютерної безпеки є системи керування доступу. Завдання системи керування доступом часто описується з точки зору захисту ресурсів системи проти невідповідного або небажаного доступу користувача. Проте, велика ступінь спільного використання може перешкодити захисту ресурсів, таким чином, досить детальна політика керування доступом повинна дозволяти виборчий обмін інформацією, коли в його відсутність, спільне використання може вважатися занадто ризикованим в цілому. Помилкові конфігурації, несправні політики, а так само недоліки в реалізації програмного забезпечення можуть призвести до глобальної незахищеності. Виявлення відмінностей між специфікаціями політик і їх передбачуваними функціями має вирішальне значення, тому що правильна реалізація і забезпечення дотримання політик конкретного додатка засновані на передумові, що специфікації даної політики є правильними. В результаті політики специфікації, представлені моделями, повинні пройти сувору перевірку і легалізацію шляхом систематичних перевірок і тестувань, щоб гарантувати, що специфікації політик дійсно відповідають бажанням творців. Перевірка відповідності політик і моделей контролю доступу нетривіальна і критична завдання. І одним з важливих аспектів такої перевірки є формальна перевірка на непослідовність і неповноту у моделі, і вимоги безпеки політики, тому що модель контролю доступу та її реалізація не обов'язково явно виражають політики, які також можуть бути приховані, вбудовані шляхом змішування з обмеженнями прямого доступу або іншого доступу моделі управління.

Ключові слова: керування доступом; системи контролю доступу; мутаційне тестування; тестування систем керування доступом; політики.

Мутационное тестирование политик управления доступом

Г. П. Чернева, П. В. Халимов

Аннотация: Одними из самых сложных, важных и неотъемлемых составляющих современной компьютерной безопасности являются системы управления доступа. Задача системы управления доступом часто описывается с точки зрения защиты ресурсов системы против несоответствующего или нежелательного доступа пользователя. Однако, большая степень совместного использования может помешать защите ресурсов, таким образом, довольно подробная политика управления доступом должна позволять избирательный обмен информацией, когда в его отсутствие, совместное использование может считаться слишком рискованным в целом. Ложные конфигурации, неисправные политики, а так же недостатки в реализации программного обеспечения могут привести к глобальной незащищенности. Выявление различий между спецификациями политик и их предполагаемыми функциями имеет решающее значение, так как правильная реализация и обеспечение соблюдения политик конкретного приложения основаны на предпосылке, что спецификации данной политики являются правильными. В результате политики спецификации, представлены моделями, должны пройти строгую проверку и легализации путем систематических проверок и тестирований, чтобы гарантировать, что спецификации политик действительно соответствуют желанию создателей. Проверка соответствия политик и моделей контроля доступа нетривиальная и критическая задача. И одним из важных аспектов такой проверки является формальная проверка на непоследовательность и неполноту в модели, и требования безопасности политики, так как модель контроля доступа и ее реализация не обязательно явно выражают политики, которые также могут быть скрыты, встроенные путем смешивания с ограничениями прямого доступа или иного доступа модели управления.

Ключевые слова: управление доступом; системы контроля доступа; мутационное тестирование; тестирование систем управления доступом; политики.

Applied problems of information systems operation

UDC 681.142

doi: 10.20998/2522-9052.2021.1.18

Victor Krasnobayev, Sergey Koshman, Dmytro Kovalchuk

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

THE DATA DIAGNOSTIC METHOD OF IN THE SYSTEM OF RESIDUE CLASSES

Abstract. The **subject** of the article is the development of a method for diagnosing data that are presented in the system of residual classes (SRC). The **purpose** of the article is to develop a method for fast diagnostics of data in the SRC when entering the minimum information redundancy. **Tasks:** to analyze and identify possible shortcomings of existing methods for diagnosing data in the SRC, to explore possible ways to eliminate the identified shortcomings, to develop a method for prompt diagnosis of data in SRC. **Research methods:** methods of analysis and synthesis of computer systems, number theory, coding theory in SRC. The following **results** were obtained. It is shown that the main disadvantage of the existing methods is the significant time of data diagnostics when it is necessary to introduce significant information redundancy into the non-positional code structure (NCS). The method considered in the article makes it possible to increase the efficiency of the diagnostic procedure when introducing minimal information redundancy into the NCS. The data diagnostics time, in comparison with the known methods, is reduced primarily due to the elimination of the procedure for converting numbers from the NCS to the positional code, as well as the elimination of the positional operation of comparing numbers. Secondly, the data diagnostics time is reduced by reducing the number of SRC bases in which errors can occur. Third, the data diagnostics time is reduced due to the presentation of the set of values of the alternative set of numbers in a tabular form and the possibility of sampling them in one machine cycle. The amount of additionally introduced information redundancy is reduced due to the effective use of the internal information redundancy that exists in the SRC. An example of using the proposed method for diagnosing data in SRC is given. **Conclusions.** Thus, the proposed method makes it possible to reduce the time for diagnosing data errors that are presented in the SRC, which increases the efficiency of diagnostics with the introduction of minimal information redundancy.

Keywords: number system; system of residue classes; operational data diagnostics; non-positional code structure; computer system; computer component.

Introduction

A foundation of some modern specialized informational and telecommunication systems is based on computer systems (CS) of handling of integer data, represented in non-positional notation in residue classes (SRC). In this case, one of the main ways of achieving high effectiveness of functioning of telecommunication systems while handling integer data in real-time is an improvement, firstly, such features of CS in SRC as reliability and performance of data handling.

It is known, that usage of such features of SRC as independence, rights equality, and low-discharge of residues $\{a_i\}$ defining non-positional code structure (NCS) of data $A_{SRC} = (a_1 \parallel a_2 \parallel \dots \parallel a_{i-1} \parallel a_i \parallel a_{i+1} \parallel \dots \parallel a_n \parallel \dots \parallel a_{n+k})$ provides high user performance of implementing in CS calculation algorithms, which consist of a set of integer arithmetical operations. The largest effectiveness of SRC usage can be achieved in case if implemented algorithms consist of a set of such arithmetical operations as addition, multiplication, and subtraction [1, 2]. On the other hand, a necessity of providing fault-tolerant functioning of CS in SRC requires the development and deployment of methods of quick control, diagnostic, and data error correction, which are different from methods, used in regular binary positional notations (PN) [3-5]. Thus, researches, devoted to the development and improvement of quick

(operative) methods of diagnostic of errors of data in CS, functioning in SRC, are important and relevant.

The aim of the article is the development of the method of quick diagnostic of data in SRC while entering minimal informational redundancy.

Main part

In the general case, the diagnosis of data in SRC is being understood as a process of defining distorted residues in NCS as $A_{SRC} = (a_1 \parallel a_2 \parallel \dots \parallel a_{i-1} \parallel a_i \parallel \dots \parallel a_{i+1} \parallel \dots \parallel a_n \parallel \dots \parallel a_{n+k})$, where n and k are quantity of informational and control bases m_i ($i = \overline{1, n+k}$) in ordered $(m_i < m_{i+1})$ SRC, correspondingly. The diagnostic of NCS is being performed after the data control for further probable error correction. In the article, the method of data diagnostic in the case of entering minimal ($k = 1$) informational redundancy is considered. The minimal code distance equals two. The method is based on the concept of an alternative number set and on the usage of features of NCS in SRC [5]. Due to those the procedure of increasing informativeness of AS in SRC is developed.

1. The method of diagnostic of non-positional code structures in the system of residue classes
Consider the method of NCS diagnostic, based on obtaining additional information about probably distorted residues of incorrect number $\tilde{A}$. This

information is contained in all possible AS of number $\tilde{A}$. Let SRC is specified by ordered ($m_i < m_{i+1}$) bases $m_1, \dots, m_{n+1}$. And let an incorrect number $\tilde{A}$ is defined in the process of calculations. For increasing informativeness about placement and error measure, it is suggested to additionally define AS of number as

$$W_{k_{p_i}}(\tilde{A}) = \{m_{k_1}, m_{k_2}, \dots, m_{k_{p_i}}\},$$

i.e. set AS:

$$\begin{aligned} W_{1_{p_1}}(\tilde{A}) &= \{m_{11}, m_{12}, \dots, m_{1_{p_1}}\}; \\ W_{2_{p_2}}(\tilde{A}) &= \{m_{21}, m_{22}, \dots, m_{2_{p_2}}\}; \\ &\dots \\ W_{n+1_{p_{n+1}}}(\tilde{A}) &= \{m_{n+11}, m_{n+12}, \dots, m_{n+1_{p_{n+1}}}\}. \end{aligned} \quad (1)$$

Tentatively calculate the value of the interval ($j+1$) of the number $\tilde{A}$ occurrence in order to define the set of values (1)

$$j_k = \bar{m}_k \cdot \gamma_k \pmod{m_k}, \quad (2)$$

for $k = \overline{1, n+1}$. Also, due to value $k = n+1$ the $W_{n+1_{p_{n+1}}}(\tilde{A})$ equals $W_{n+1_{p_{n+1}}}(\tilde{A}) = W(\tilde{A})$. According to (2) the formation of k tables is performed, where values γ_k are matched against Δa_i . After defining AS $W_{k_{p_i}}(\tilde{A})$, which called primary ASs, the secondary ASs is defined as vectors, components of which are possible values of errors Δa_i as:

$$\begin{aligned} W_1^{(1)}(\tilde{A}) &= \{\Delta a_1^{(1)}, \Delta a_2^{(1)}, \dots, \Delta a_{n+1}^{(1)}\}, \\ &\dots \\ W_1^{(\psi_1)}(\tilde{A}) &= \{\Delta a_1^{(\psi_1)}, \Delta a_2^{(\psi_1)}, \dots, \Delta a_{n+1}^{(\psi_1)}\}; \\ W_2^{(2)}(\tilde{A}) &= \{\Delta a_1^{(2)}, \Delta a_2^{(2)}, \dots, \Delta a_{n+1}^{(2)}\}, \\ &\dots \\ W_2^{(\psi_2)}(\tilde{A}) &= \{\Delta a_1^{(\psi_2)}, \Delta a_2^{(\psi_2)}, \dots, \Delta a_{n+1}^{(\psi_2)}\}; \end{aligned}$$

and so on to value of vectors in the form of:

$$W_n^{(\psi_n)}(\tilde{A}) = \{\Delta a_1^{(\psi_n)}, \Delta a_2^{(\psi_n)}, \dots, \Delta a_{n+1}^{(\psi_n)}\},$$

and completely to value of vector as: $W_{n+1}(\tilde{A}) = \{\Delta a_1, \Delta a_2, \dots, \Delta a_{n+1}\}$.

Components of the vector $W_{n+1}(\tilde{A})$ are compared to according components of all vectors $W_i^{(\psi_i)}(\tilde{A})$ for $i = \overline{1, n}$. The matching the measure components of

vectors are chosen and the bases of SRC are defined, and their set defines resulted AS in the form of

$$W'(\tilde{A}) = \{m_{z_1}, m_{z_2}, \dots, m_{z_p}\}.$$

Indeed, among AS $W_{k_p}(\tilde{A})$ there is always a basis m_i , which gives an error Δa_i , and that basis can be only among bases, which are common for the set (1)

$$W(\tilde{A}) \geq W'(\tilde{A}). \quad (3)$$

When an Δa_i has such value, that number A starts to belong to the interval, then an equation is fulfilled

$$W(\tilde{A}) = W'(\tilde{A}). \quad (4)$$

where $M = \prod_{i=1}^n m_i$ and $M_1 = M \cdot m_{n+1}$.

Thus, the idea of suggested method lays in the following: all possible ASs are defined on each of the intervals of number A occurrence. After this, the common for these intervals bases $m_{z_1}, \dots, m_{z_p}$, which possibly give errors, are defined. That set of bases define sought AS. The reduction of the number of bases in AS increases informativeness of AS $W(\tilde{A})$ about place and measure of error. It decreases the time of reducing AS to incorrect basis (the number of steps of tentatively AS defining is decreasing) and increases operability of diagnostic of data in SRC. The structure scheme of the process of AS reduction is presented on fig.1.

2. Geometrical model of the procedure of the increasing as informativeness. The geometrical model of the suggested method should be considered. The defining of number ($j+1$) of the interval of distorted number $\tilde{A}$ occurrence, which is influenced by error Δa_i , is equivalent to the shift of this number in the interval $\left[j \frac{M_i}{m_i}, (j+1) \frac{M_1}{m_1}\right)$ to the left to value $j \frac{M_1}{m_1}$. Decompose numerical sequence to corresponding intervals with length: $\frac{M_1}{m_1}, \frac{M_1}{m_2}, \dots, \frac{M_1}{m_{n+1}}$.

Define the numbers of intervals ($j+1$), in which there is an operand $\tilde{A}$ on each of numerical segments as

$$\begin{aligned} T_{j_1} &= \left[j_1 \frac{M_1}{m_1}, (j_1 + 1) \frac{M_1}{m_1} \right); \\ &\dots \\ T_{j_{n+1}} &= \left[j_{n+1} \frac{M_1}{m_{n+1}}, (j_{n+1} + 1) \frac{M_1}{m_{n+1}} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Defining the primary ASs (1) corresponds to defining the intervals numbers (5).

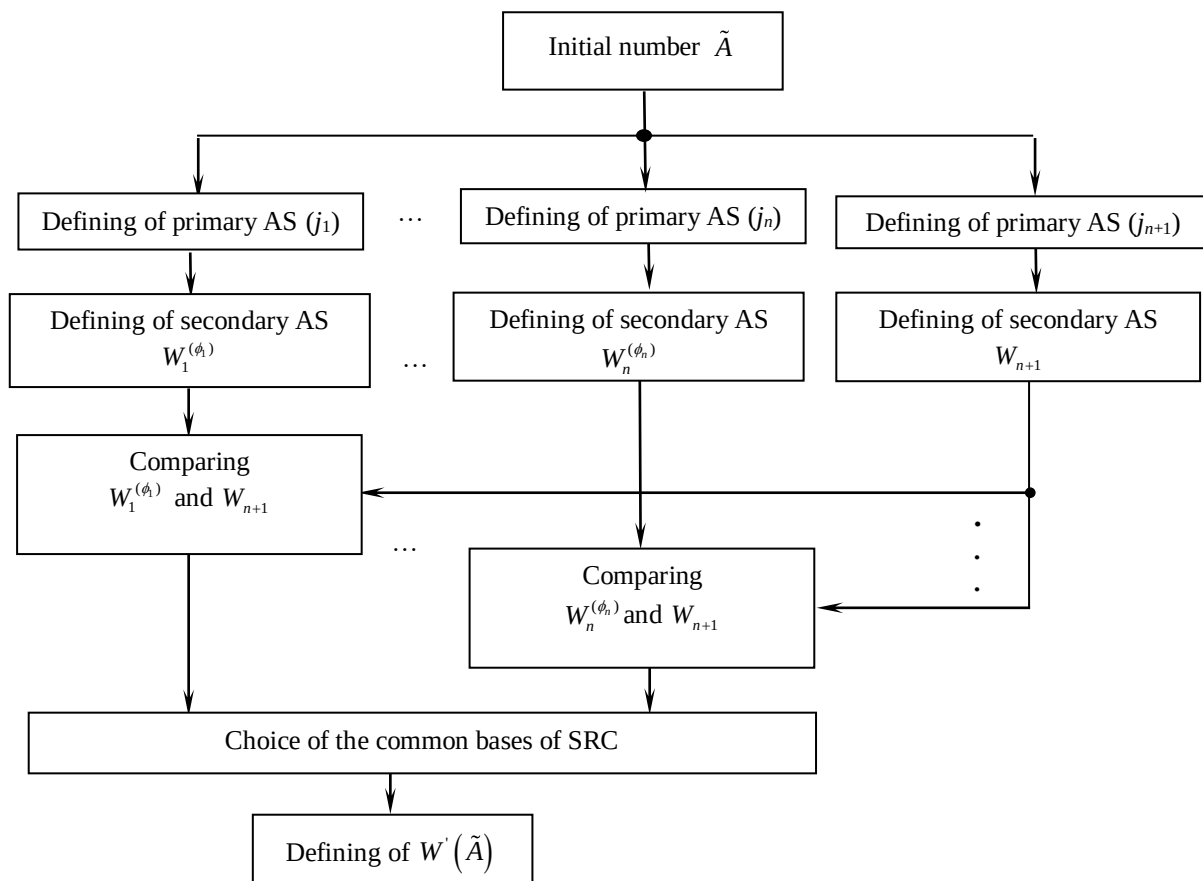


Fig. 1. Scheme of choice of bases in the alternative set of numbers in SRC

Defining the secondary AS $W'(\tilde{A})$ geometrically correspond to defining the interval $[z_1, z_2]$, where

$$z_1 = \max \in j_i \frac{M_1}{m_i}; \quad z_2 = \min \in (j_i + 1) \frac{M_1}{m_i},$$

i.e. sought interval is being defined as intersecting of intervals sets (5)

$$T_{W'(\tilde{A})} = T_{j_1} \wedge T_{j_2} \wedge \dots \wedge T_{j_{n+1}}.$$

It is obvious, that

$$z_2 - z_1 = \frac{M_1}{M_{n+1}}. \quad (6)$$

Condition (6) is equivalent to condition (3). If error moves operand $\tilde{A}$ to interval $[(m_{n+1} - 1), M, M_1]$, then

$$z_2 - z_1 = \frac{M_1}{m_{n+1}} = M. \quad (7)$$

Condition (7) is equivalent to condition (4).

The suggested geometrical model confirms the correctness of the method's mathematical description, and also more clearly demonstrates the idea of the procedure of informativeness AS increasing or the reduction of the numerical interval of distorted number $\tilde{A}$ occurrence.

Consider an example of defining AS of number $\tilde{A}$ according to developed method. There is SRC with bases $m_1 = 2$, $m_2 = 3$, $m_3 = 5$.

The code words of this SRC are presented in the table 1.

Table 1. The set of code words

A in PN	m_1	m_2	m_3	A in PN	m_1	m_2	m_3
0	0	0	0	15	1	0	0
1	1	1	1	16	0	1	1
2	0	2	2	17	1	2	2
3	1	0	3	18	0	0	3
4	0	1	4	19	1	1	4
5	1	2	0	20	0	2	0
6	0	0	1	21	1	0	1
7	1	1	2	22	0	1	2
8	0	2	3	23	1	2	3
9	1	0	4	24	0	0	4
10	0	1	0	25	1	1	0
11	1	2	1	26	0	2	1
12	0	0	2	27	1	0	2
13	1	1	3	28	0	1	3
14	0	2	4	29	1	2	4

Thus,

$$M = 2 \cdot 3 = 6, \quad M_1 = M \cdot 5 = 30,$$

$$m_{n+1} = m_3 = 5, \quad A = (0, 2, 2), \quad \Delta A = (0, 2, 0).$$

Assume, that after the influence of a single error

$$\Delta A = (0, 0, \dots, \Delta a_i, \dots, 0)$$

by i -th basis ($\Delta a_2 = 2$) there is a number

$$\tilde{A} = A + \Delta A = (0, 2, 2).$$

In order to define the set of primary ASs it is needed to tentatively define values j_k . For this the nuvelization of a number $\tilde{A}$ accordingly to the tables of nuvelization constants (table 2-4) is performed.

After this there are $\gamma_1 = 1, \gamma_2 = 1, \gamma_3 = 2$.

The set of primary ASs is defined as

$$W_{1p1}(\tilde{A}) = \{m_2, m_3\},$$

$$W_{2p2}(\tilde{A}) = \{m_1, m_3\} \Delta A = (0, 0, \dots, \Delta a_i, \dots, 0),$$

$$W_{3p3}(\tilde{A}) = W(\tilde{A}) \setminus \{m_1, m_2, m_3\}.$$

Table 2 – Nuvelization constants ($m_1 \rightarrow m_2$)

m_1	m_2
(1, 1, 1)	(0, 1, 4) (0, 2, 2)

Table 3 – Nuvelization constants ($m_1 \rightarrow m_3$)

m_1	m_3
(1, 1, 1)	(0, 0, 1) (0, 2, 2) (0, 0, 3) (0, 1, 4)

Table 4 – Nuvelization constants ($m_2 \rightarrow m_3$)

m_2	m_3
(0, 1, 0) (1, 2, 0)	(1, 0, 3) (0, 2, 2) (1, 1, 1)

The set of secondary ASs is defined by the tables 5-7, which are formed by values j_n :

$$\text{for } \gamma_3 = 2, \quad W_3(\tilde{A}) = \{1, 1, 2\};$$

$$\text{for } \gamma_2 = 1, \quad W_2^{(1)}(\tilde{A}) = \{1, 0, 2\};$$

$$W_2^{(2)}(\tilde{A}) = \{0, 0, 3\};$$

$$\text{for } \gamma_1 = 1, \quad W_1^{(1)}(\tilde{A}) = \{0, 2, 3\};$$

$$W_1^{(2)}(\tilde{A}) = \{0, 0, 4\}.$$

Table 5 – Secondary Ass (γ_3)

γ_3	Possible values of errors	$W_i^{(\gamma_i)}$
0	none	–
1	$\Delta a_2 = 1, \Delta a_3 = 1$	$W_3^{(1)}(\tilde{A}) = \{0, 1, 1\}$
2	$\Delta a_1 = 1, \Delta a_2 = 1, \Delta a_3 = 2$	$W_3^{(1)}(\tilde{A}) = \{1, 1, 2\}$
3	$\Delta a_1 = 1, \Delta a_2 = 2, \Delta a_3 = 3$	$W_3^{(1)}(\tilde{A}) = \{1, 2, 3\}$
4	$\Delta a_2 = 2, \Delta a_3 = 4$	$W_3^{(1)}(\tilde{A}) = \{0, 2, 4\}$

Table 6 – Secondary Ass (γ_2)

γ_2	Possible values of errors	$W_i^{(\gamma_i)}$
0	$\Delta a_3 = 1$	$W_2^{(1)}(\tilde{A}) = \{0, 0, 1\}$
1	$\Delta a_1 = 1, \Delta a_3 = 1, \Delta a_2 = 1$	$W_2^{(1)}(\tilde{A}) = \{1, 0, 2\},$ $W_2^{(2)}(\tilde{A}) = \{0, 0, 3\}$
2	$\Delta a_3 = 4$	$W_2^{(1)}(\tilde{A}) = \{0, 0, 4\}$

Table 7 – Secondary Ass (γ_1)

γ_1	Errors	$W_i^{(\gamma_i)}$
0	$\Delta a_2 = 1, \Delta a_3 = 2, \Delta a_3 = 1$	$W_1^{(1)}(\tilde{A}) = \{0, 1, 1\},$ $W_1^{(2)}(\tilde{A}) = \{0, 0, 2\}$
1	$\Delta a_2 = 2, \Delta a_3 = 3, \Delta a_3 = 3$	$W_1^{(1)}(\tilde{A}) = \{0, 2, 3\},$ $W_1^{(2)}(\tilde{A}) = \{0, 0, 4\}$

Implementation of choice of common SRC bases is suitable in the form of tables (tables 8), where sign “+” means match of the components of secondary ASs, and sign “-” means mismatch. Those tables show, that vectors components match in the bases m_1, m_3 , i.e. the sought AS is as

$$W_3(\tilde{A}) = \{m_1, m_3\} \text{ (table 8, a).}$$

Therefore, $W(\tilde{A}) > W'(\tilde{A})$. Thus, the increase of the informativeness about error placement in the distorted number $\tilde{A}$ is guaranteed by the described method.

Table 8 – Choice of common SRC

a			b		
m_1	m_2	m_3	m_1	m_2	m_3
1	1	2	1	1	2
1	0	2	0	0	3
+	-	+	-	-	-

c			d		
m_1	m_2	m_3	m_1	m_2	m_3
1	1	2	1	1	2
0	2	3	0	0	4
-	-	-	-	-	-

In the geometrical interpretation example for given SRC is represented in the following way (Fig. 2).

The segment $[0, 30)$ is decomposed to according numerical intervals $[15, 30)$, $[10, 15)$ and $[12, 18)$.

Define numbers of intervals, in which an operand $\tilde{A} = (1, 2, 2)$ placed:

$$T_{j_1} = [15, 30), \quad T_{j_2} = [10, 20),$$

$$T_{j_3} = [12, 18).$$

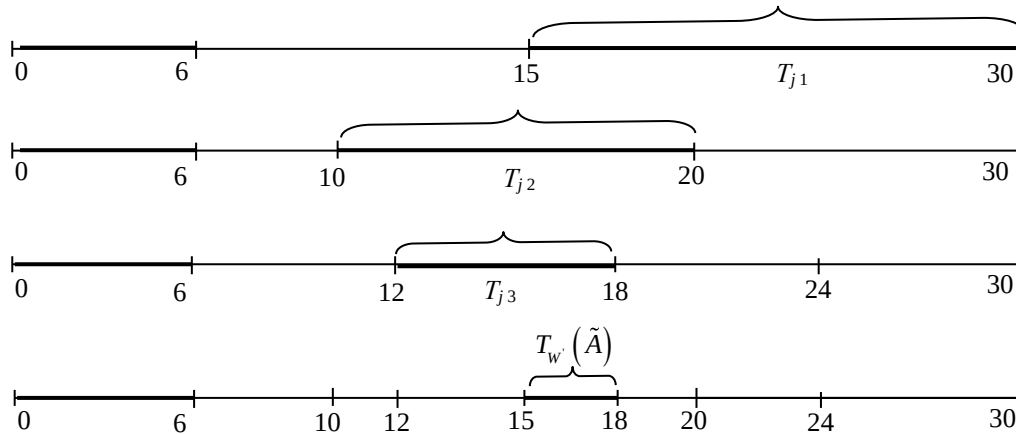


Fig. 2. Scheme of the defining a sought interval

A sought interval is defined by expression $T_{w'}(\tilde{A}) = [15, 18)$. It is obvious, that interval $T_{w'}(\tilde{A})$ is being reduced, compared to T_{j_3} , by three units (by 50%), and that leads to a decrease of the quantity of options of possible errors. Geometrical interpretation confirms the effectiveness of the considered method of data in SRC diagnostic.

Conclusion

Thus, the suggested method allows decreasing the time of diagnostic of errors of data, represented in SRC, which increases diagnostic operability. A reduction of the quantity of bases in AS increases informativeness AS about error placement and measure. It decreases the time of AS reduction to incorrect bases (the number of steps of tentatively AS defining is decreasing). The usage of the suggested method of operative diagnostic of data increases the total effectiveness and feasibility of using non-positional code structures in SRC in computing systems.

The time of data diagnostic, compared to known methods, is decreasing firstly due to excluding the procedure of transforming numbers in SRC to positional notation as in known methods, i. e. eliminating a positional operation of numbers comparing. Secondly, the time of data diagnostic is decreased by reducing the quantity of SRC bases, which are giving the possibility of mistake. Thirdly, the time of data diagnostic is decreased due to the usage of tabular sample value of an alternative set (AS) of numbers in SRC in one beat.

Therefore, the suggested method allows reducing the time of diagnosis of data errors in NCS, represented in SRC, which is increasing the diagnostic operability while entering minimal informational redundancy. Geometrical model of the procedure of AS informativeness increasing and specific example of usage of the suggested method of diagnostic of data in SRC confirms its practical feasibility.

The most effective way of the method usage is in the computational chain, which does not allow perform all planned procedures to AS reduction to the incorrect basis, i.e. in a quite long chain of calculations of CS.

REFERENCES

1. Krasnobayev, V.A., Kuznetsov, A.A., Koshman, S.A. and Kuznetsova, K.O. (2020), "A method for implementing the operation of modulo addition of the residues of two numbers in the residue number system", *Cybernetics and Systems Analysis*, Vol. 56, No. 6, pp 1029-1038, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00323-9>.
2. Krasnobayev, V.A. and Koshman, S.A. (2018), "A method for operational diagnosis of data represented in a residue number system", *Cybernetics and Systems Analysis*, Vol. 54, Issue 2, pp. 336-344, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-018-0035-y>.
3. Krasnobayev, V.A., Yanko, A.S. and Koshman, S.A. (2016), "A Method for arithmetic comparison of data represented in a residue number of system", *Cybernetics and Systems Analysis*, Vol. 52, Issue 1, pp. 145-150, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-016-9809-2>.
4. Krasnobayev, V.A. and Koshman, S.A. (2019), "Method for implementing the arithmetic operation of addition in residue number system based on the use of the principle of circular shift", *Cybernetics and Systems Analysis*, Vol. 55, Issue 4, pp. 692-698, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00179-8>.
5. Krasnobayev, V.A., Koshman, S.A. and Mavrina, M.A. (2014), "A method for increasing the reliability of verification of data represented in a residue number system", *Cybernetics and Systems Analysis*, Vol. 50, Issue 6, pp. 969-976, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9688-3>.

Краснобаев Виктор 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, Assistant Professor, Assistant 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;

Kovalchuk Dmytro – 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>.

Метод диагностики данных у системе залишковых классов

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

Анотація. Предметом статті є розробка методу діагностики даних, які представлені в системі залишкових класів (СЗК). **Метою** статті є розробка методу швидкої діагностики даних у СЗК при введенні мінімальної інформаційної надмірності. **Задачі:** провести аналіз і виявити можливі недоліки існуючих методів діагностики даних у СЗК, дослідити можливі шляхи усунення виявлених недоліків, розробити метод оперативної діагностики даних у СЗК. **Методи** дослідження: методи аналізу і синтезу комп'ютерних систем, теорія чисел, теорія кодування у СЗК. **Отримані наступні результати.** Показано, що основним недоліком існуючих методів є значний час діагностики даних при необхідності введення значної інформаційної надмірності у непозиційну кодову структуру (НКС). Розглянутий у статті метод дозволяє підвищити оперативність процедури діагностики при введенні у НКС мінімальної інформаційної надмірності. Час діагностики даних, в порівнянні з відомими методами, скорочується в першу чергу за рахунок усунення процедури перетворення чисел з НКС у позиційний код, а також усунення позиційної операції порівняння чисел. По-друге, час діагностики даних скорочується за рахунок зменшення кількості базисів СЗК, в яких можуть виникнути помилки. По-третє, час діагностики даних скорочується за рахунок представлення набору значень альтернативної сукупності (АС) чисел у табличному вигляді та можливості вибірки їх за один машинний такт. Кількість інформаційної надмірності, що додатково вводиться, зменшується за рахунок ефективного використання внутрішньої інформаційної надмірності, яка існує у СЗК. Наведено приклад використання запропонованого методу діагностики даних у СЗК. **Висновки.** Таким чином, запропонований метод дозволяє скоротити час діагностики помилок даних, що представлені у СЗК, та підвищує оперативність діагностики при введенні мінімальної інформаційної надмірності.

Ключові слова: система числення; система залишкових класів; оперативна діагностика даних; непозиційна кодова структура; комп'ютерна система.

Метод диагностики данных в системе остаточных классов

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

Аннотация. Предметом статьи является разработка метода диагностики данных, которые представлены в системе остаточных классов (СОК). **Целью** статьи является разработка метода быстрой диагностики данных в СОК при вводе минимальной информационной избыточности. **Задачи:** провести анализ и выявить возможные недостатки существующих методов диагностики данных в СОК, исследовать возможные пути устранения выявленных недостатков, разработать метод оперативной диагностики данных в СОК. **Методы исследования:** методы анализа и синтеза компьютерных систем, теория чисел, теория кодирования в СОК. **Получены следующие результаты.** Показано, что основным недостатком существующих методов является значительное время диагностики данных при необходимости введения значительной информационной избыточности в непозиционную кодовую структуру (НКС). Рассмотренный в статье метод позволяет повысить оперативность процедуры диагностики при введении в НКС минимальной информационной избыточности. Время диагностики данных, по сравнению с известными методами, сокращается в первую очередь за счет исключения процедуры преобразования чисел из НКС в позиционный код, а также исключения позиционной операции сравнения чисел. Во-вторых, время диагностики данных сокращается за счет уменьшения количества базисов СОК, в которых могут возникнуть ошибки. В-третьих, время диагностики данных сокращается за счет представления набора значений альтернативной совокупности (АС) чисел в табличном виде и возможности выборки их за один машинный такт. Количество дополнительно вводимой информационной избыточности уменьшается за счет эффективного использования внутренней информационной избыточности, существующей в СОК. Приведен пример использования предложенного метода диагностики данных в СОК. **Выводы.** Таким образом, предлагаемый метод позволяет сократить время диагностики ошибок данных, которые представлены в СОК, что повышает оперативность диагностики при введении минимальной информационной избыточности.

Ключевые слова: система счисления; система остаточных классов; оперативная диагностика данных; непозиционная кодовая структура; компьютерная система.

Helen Makogon¹, Roman Suchko¹, Viktor Moskalenko¹,
Igor Kalinin¹, Sergiy Burdin², Viktoriia Iksarytsia²

¹ Military Institute of Tank Troops of National Technical University, Kharkiv, Ukraine

² State boarding school with enhanced military and physical training “Cadet Corps” Kharkiv, Ukraine

APPLICATION OF THE CORRELATION ANALYSIS MATHEMATICAL APPARATUS FOR DETERMINATION THE LEAD-ACID BATTERIES MANAGEMENT AND STATUS CONTROL MINIMUM DIAGNOSIS

Abstract. The **subject matter** of the article is the lead-acid batteries carrier and management. The **goal** of the study is the development of a methodology for assessing the lead-acid batteries' parameters and to provide recommendations for their long-term management and carrier in the army operation. **The tasks** to be solved are: on the basis of the lead-acid batteries operation experience to define a set of diagnostic parameters on which it is possible to draw a conclusion about the technical state of a battery and change of its electric, operational and design properties; to determine the correlations between the properties of the battery and make their assessment based on the established criteria; to build a diagnostic graph-model of causal relationships of a battery's parameters in the form of a correlation galaxy; to justify the lead-acid batteries carrier and management minimum diagnosis which can be carried out during their life cycle management and status control under the lack of time. General scientific and special **methods** of scientific knowledge are used. The following **results** were obtained: The set of diagnostic parameters to assess the battery technical state was determined. Statistical data processing using the mathematical apparatus of correlation analysis was done. The diagnostic graph model of a lead-acid battery in the form of a correlation galaxy was constructed. The lead-acid batteries carrier and management minimum diagnosis during the life cycle was determined. **Conclusions.** Analysis of the experience of the lead-acid batteries operation determines a set of diagnostic parameters, which can be used to draw a conclusion about the technical state of a battery and change of its electric, operational and design properties. As generalized diagnostic parameters of the battery technical state can be considered the State of Health and the State of charge. Statistical data processing using the mathematical apparatus of correlation analysis allows to determine the causal and dependencies between the battery's parameters and make their assessment based on the established criteria. Presentation of generalized results in the form of a correlation galaxy makes it possible to build a diagnostic graph-model of battery in the form of a correlation galaxy. Control of the SoC and SoH of the lead-acid battery will ensure the monitoring of the remaining charge, as well as the issuance of a warning about the need to replace the battery. A promising direction in the development of battery operation can be considered the development of battery-powered trackers – software and hardware devices capable of caring for battery care and battery management.

Keywords: lead-acid batteries; battery care and battery management; state of charge; state of health.

Formulation of the problem and research tasks

Ensuring the proper level of readiness of equipment for use largely depends on the state of the GB. During operation, the battery may have such faults as sulfation of the plates, accelerated self-discharge, short circuit, electrolyte leakage, oxidation of the pole pins, which usually leads to deterioration of its electrical characteristics. The main means of the battery maintaining in a technically sound condition during the operation of combat vehicles is timely and high-quality maintenance. Based on the list and frequency of their work are included in the first or second maintenance.

The Armed Forces has a planned and preventive system of maintenance and repair of armored weapons and military equipment (AWME) based on the mandatory performance of work on the care of AMWE and lead-acid batteries, in particular, both in the process of their use and during storage.

However, the analysis of the existing maintenance system showed its low efficiency in modern conditions and revealed a number of shortcomings that do not allow to fully ensure the required level of reliability of equipment.

The **relevance** of the study is due to the fact that the existing system of AWME maintenance according

to the authors, is obsolete and has shortcomings that lead to excessive expenditure of human and material resources and significant underutilization of battery resources. Establishing the optimal frequency of battery maintenance will reduce the complexity of current repairs, the number of operations and downtime AWME in general.

More progressive can be considered a maintenance system, which includes elements of maintenance by condition (“with parameter control” or “with control of the level of reliability”) and elements of the planned and preventive maintenance system by operation (by resource). Such a “mixed” battery maintenance can be implemented as part of long-term planning of battery care and battery management in the army.

In this regard, there is a need to obtain prompt and reliable information about the current state of the battery to determine its timely replacement.

Analysis of recent research and publications of recent research and publications on the above issues shows that the known methods of battery rapid assessment are based on the characteristics obtained by indirect measurements. The basis of such methods are special devices – GB analyzers (trackers). The principle of their operation is based on measuring the battery's parameters of the (usually internal resistance) on alternating current for 10–20 seconds.

The values of the measured parameters allow to estimate the degree of the battery degradation and to predict the value of the reserve and nominal capacity, the current of the starter discharge of the battery.

Known today methods of battery's technical state monitoring are characterized by long duration, the negative impact of deep discharge, as well as significant energy and human costs [1–3].

Express–diagnosis allows to reduce these shortcomings to a minimum and is based on the mathematical description of a battery means of parameters, proceeding from their properties [4, 5].

The **goal** of the study is the development of a methodology for assessing the lead–acid batteries' parameters and to provide recommendations for their long–term management and carrier in the army.

This goal defined the following research **tasks**:

- on the basis of the lead–acid batteries operation experience to define a set of diagnostic parameters on which it is possible to draw a conclusion about the technical state of a battery and change of its electric, operational and design properties;

- to determine the correlations between the properties of the battery and make their assessment based on the established criteria;

- to build a diagnostic graph–model of a battery in the form of a correlation galaxy;

- to justify the lead–acid batteries carrier and management minimum diagnosis which can be carried out during their life cycle management via status control under the lack of time.

General scientific and special **methods** of scientific knowledge are used.

Main material

1. Determining the set of diagnostic parameters to assess the battery technical state and change its electrical characteristics.

Analysis of the technical literature [4, 6] allowed us to identify parameters by which we can assess the battery technical state.

Conventionally, they can be divided into structural, electrical and operational.

To further formalize the problem of determining the correlations between the battery's parameters, each of the parameters corresponds to the symbol. Summary data are presented in tables 1, 2 and 3.

Note that the term “available capacity” is defined as the capacity that the battery has in the current conditions. The actual capacity is determined on a fully charged battery at a constant temperature $T = 25 \pm 2^\circ\text{C}$. Under such conditions, the ratio $C = FCC$. In other conditions, the actual capacity will be the calculated value of kC , (k is a coefficient takes into account the change in the capacity of the battery depending on the temperature [6–9]).

According to the world experience of battery operation, the assessment of their technical state is similar to the Battery Management and Battery Status Control procedures, so the authors have invited to introduce such generalized parameters that characterize the technical state of battery operated in the military.

Table 1 – List of the main design battery's parameters to determine the technical condition

№	Name	Unit	Sym–bol	Nota–tion
1	Overall dimensions of plates	m ³	D	x_1
2	Weight of plates (with active substance)	kg	m_{pl}	x_2
3	Porosity of plates	%	γ	x_3
4	Chemical composition of plates	—	λ	x_4
5	Separator type	—	—	x_5
6	Battery connection method	—	—	x_6
7	Number of batteries	piece	—	x_7
8	Active mass utilization factor	%	N_{ac}	x_8

Table 2 – List of the main operating parameters of the battery to determine the technical condition

№	Name	Unit	Sym–bol	Nota–tion
1	Electrolyte volume	l	V_{el}	x_9
2	Electrolyte density	g/sm ³	ρ	x_{10}
3	Starting current	A	CCA	x_{11}
4	Discharge time	hour	t_d	x_{12}
5	Charge time	hour	t_c	x_{13}
6	Self–discharge	A	C	x_{14}
7	Service life	cycle	n	x_{15}
8	Service life	pix	l	x_{16}
9	Number of faulty batteries	piece	N_s	x_{17}
10	Condition of leads	—	—	x_{18}
11	Condition of the body	—	—	x_{19}
12	Condition of the plug	—	—	x_{20}
13	Condition of cover	—	—	x_{21}
14	Temperature	°C	T	x_{22}

Table 3 – List of basic electrical parameters of the battery to determine the technical condition

№	Name	Unit	Sym–bol	Nota–tion
1	Internal Resistance	Ohm	R	x_{23}
2	Design Capacity:	A·h	DC	x_{23}
3	Full–Charge Capacity	A·h	FCC	x_{24}
4	Available Capacity	A·h	C	x_{25}
5	Voltage	V	U	x_{26}
6	Open–Circuit Voltage	V	OCV	x_{27}
7	Terminate Voltage	B	TU	x_{28}
8	Discharge Current	A	I_d	x_{29}
9	Charge Current	A	I_{ch}	x_{30}

SoH (State of Health) is defined as the degree of performance of the battery, which reflects the current state of the battery compared to ideal. In accordance with the parameter *SoH* set the notation x_{31} .

SoC (State of Charge) is defined as the degree of charge of the battery, which shows how much of the full charge is still accumulated in the battery. In accordance with the parameter *SoC* we set the symbol x_{32} .

The *SoC* will determine how much battery power is left to maintain and charge, while the *SoH* will indicate when the battery needs to be replaced [4, 7, 8]. Thus, the technical condition of the battery will be determined by the parameter vector

$$\overline{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

here n is number of parameters that determine the technical condition of the GB.

2. Statistical data processing using the mathematical apparatus of correlation analysis.

Rechargeable batteries can operate within the specified service life in compliance with the rules of operation and storage. As noted, the greatest impact on the performance and service life of batteries are operating conditions, such as ambient temperature, depth of discharge, discharge and charging currents, and so on. Note that based on the results of the study, we can conclude that the increase in internal resistance reduces the power characteristics of the battery, but to a greater extent there is a degradation of capacity. At the same time, the battery maintains a normal value of the starting current almost until the very end of the service, and their capacity is constantly reduced. Fig. 1 shows the ratio of capacitance and starting current 20 of the studied 12ST–85R batteries depending on the power.

The main reason for the failure of the battery can be considered to be the loss of battery capacity, as illustrated in Fig. 2. The values of the capacitance are marked on the abscissa axis, and the values of the starting current are marked on the ordinate axis.

As one can see from the figure, most batteries have maintained the allowable values of the starting current when the capacity drops below 40%.

For further research, an assumption was made about the normal nature of the distribution of the batteries' parameters to assess its technical state. The study was based on information and analytical materials on the impact of operating conditions on performance and service life of batteries.

In order to define the relationship between the parameters that determine the technical condition of the battery and to make their assessment, it is proposed to use a mathematical apparatus of correlation analysis, namely multiple correlation. The results of monitoring n batteries can be presented as a matrix.

The results of monitoring n batteries can be presented as a matrix

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{ik} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

where the values of the type “Battery – parameter” characterize the state of the i -th battery on the j -th parameter.

We assume that, $\bar{X}_1, \dots, \bar{X}_n, \dots$, form a general population with a distribution density:

$$f_{\bar{X}}(x_1, x_2, \dots, x_k) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^k |\Sigma|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x - \bar{\mu})^T \Sigma^{-1}(x - \bar{\mu})\right), \quad (3)$$

here $|\Sigma|$ is the determinant of the covariance matrix of dimension $k \times k$; $\bar{\mu}$ is the k -dimensional vector of mathematical expectations.

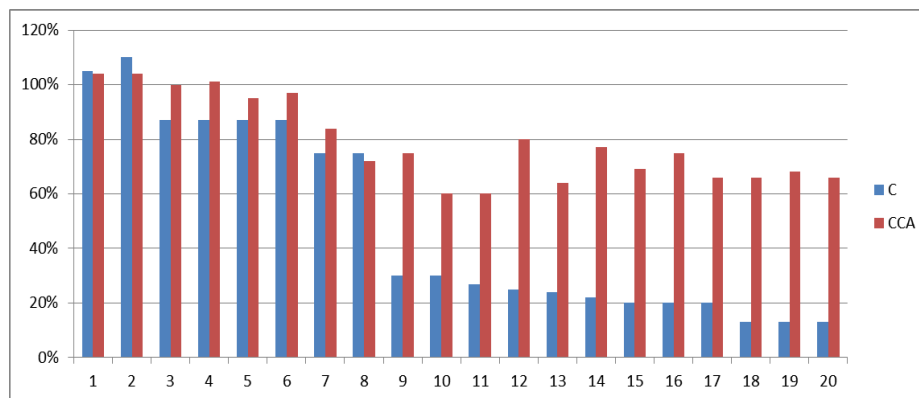


Fig. 1. The ratio of capacitance and starting current of the 20 studied batteries depending on the power

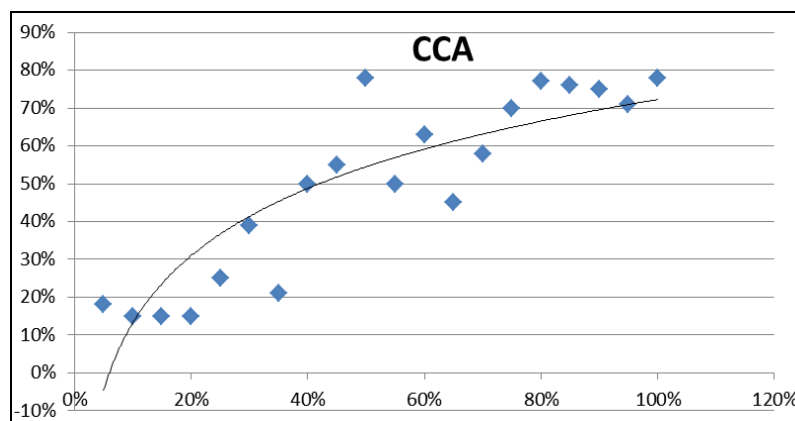


Fig. 2. Indicators of capacity and starting current of 20 age batteries

Using the well-known apparatus of mathematical statistics and probability theories, it is proposed to estimate the numerical characteristics of the vector of parameters $\bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, partial and multiple correlation coefficients [10, 11].

The authors performed statistical processing of the results of observations of $n = 20$ batteries at different terms of their operation for $k = 31$ parameters.

Data sampling can be considered representative and sufficient for statistical processing. Using the *Statistica* application package, the numerical values of the matrix X were estimated and, based on the assumption of the normal nature of the distribution of a certain k -dimensional general population, partial and multiple correlation coefficients were obtained.

Fig. 3 shows a fragment of the dialog box during operation of the application package *Statistica* [12].

To perform calculations, the threshold level of significance of the null hypothesis about the value of even correlation coefficients was set $\alpha = 0,05$.

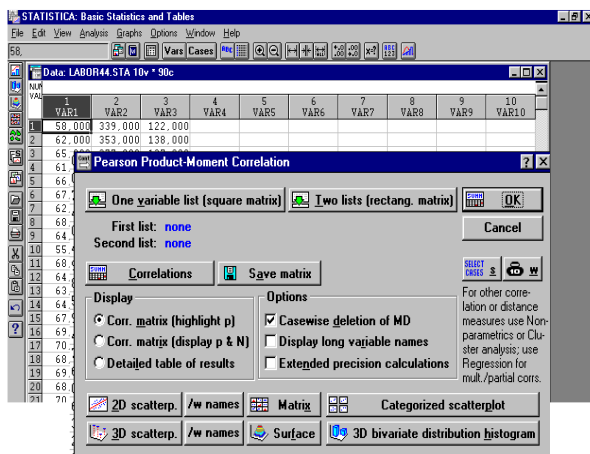


Fig. 3. Carrying out calculations in the Statistica application package

$$\|r_{ij}\| = \begin{pmatrix} 1 & 0,62 & 0,12 & 0,1 & 0,49 & 0,38 & 0,46 & 0,38 & 0,48 & 0,29 \\ & 1 & -0,39 & -0,2 & -0,33 & -0,78 & -0,4 & -0,78 & -0,49 & -0,44 \\ & & 1 & 0,04 & 0,45 & 0,1 & 0,13 & 0,1 & 0,73 & 0,2 \\ & & & 1 & 0,61 & 0,49 & 0,43 & 0,49 & 0,36 & 0,39 \\ & & & & 1 & 0,5 & 0,59 & 0,5 & 0,59 & 0,66 \\ & & & & & 1 & -0,42 & -0,8 & -0,43 & -0,33 \\ & & & & & & 1 & 0,46 & 0,4 & 0,53 \\ & & & & & & & 1 & 0,45 & 0,43 \\ & & & & & & & & 1 & 0,29 \\ & & & & & & & & & 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

As an example, the results indicate a low correlation between the discharge current and the capacitance of the battery, namely $r_{7,8} = 0,55$. The authors note the possibility of establishing causal relationships between the battery's parameters.

For example, the internal resistance is influenced by other parameters, such as electrolyte density (positive correlation), and the full-charge capacity *FCC* depends on the internal resistance (negative correlation). It is proposed

As a result, the number of parameters for assessment the battery technical state was reduced to $m=10$:

- y_1 – electrolyte density ρ ;
- y_2 – internal resistance R ;
- y_3 – design capacity *DC*;
- y_4 – temperature T ;
- y_5 – full-charge capacity *FCC*;
- y_6 – discharge time t_d ;
- y_7 – *SoC*;
- y_8 – discharge current I_d ;
- y_9 – *SoH*;
- y_{10} – open-circuit voltage *OCV*.

The results of correlation and factor analysis showed that the effects of four electrical, four operational and two generalized battery parameters are well correlated.

Thus, the relationship between the battery parameters assesses its technical state, is illustrated by a correlation matrix of the form:

$$K = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1m} \\ & K_{22} & \dots & K_{2m} \\ & & \dots & \dots \\ & & & K_{mm} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

In order to clarify the statements about the correlations of the elements of the battery's parameters vector $\bar{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$ let's use a normalized correlation matrix

$$\|r_{ij}\| = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1m} \\ & 1 & r_{23} & \dots & r_{2m} \\ & & 1 & \dots & r_{3n} \\ & & & \dots & 1 \\ & & & & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

According to the results of the calculations, the following values of the matrix (4) were obtained:

to use the identified dependences to build a diagnostic graph model of the lead-acid battery.

3. Diagnostic graph-model of GB in the form of a correlation galaxy.

The presentation of generalized results in the form of a correlation galaxy makes it possible to build a diagnostic graph-model of battery in the form of a correlation galaxy. The vertices of the graph will be the battery's parameters, and the arcs will indicate the

relationship of the parameters. Arcs from the cause to the effect are drawn between the interconnected vertices, which in this case will take into account the correlation sign.

Fig. 4 shows a fragment of the graph model of the lead–acid battery. The vertices of the graph corresponding to the operating parameters of the battery (electrolyte density, temperature, time and discharge current) are marked in green.

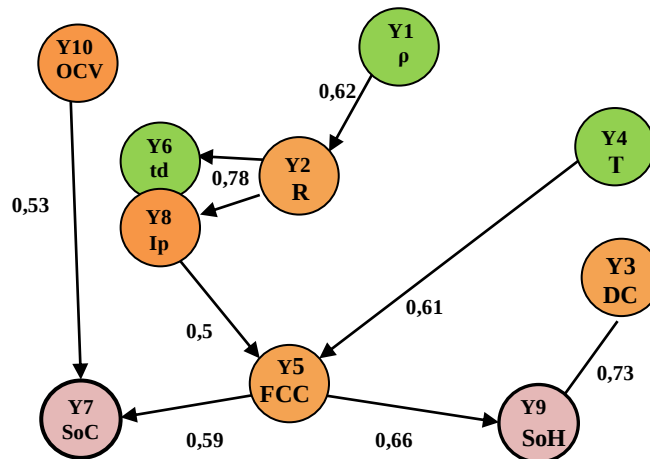


Fig. 4. Fragment of the diagnostic graph–model of GB in the form of a correlation galaxy

In the process of discharge or discharge AB is "pass" of capacity. Given the close correlation between the parameters y_6 – discharge time t_d and y_8 – discharge current I_d , it is proposed to introduce the concept of passed charge C_{pass} , i.e. the capacity given or received by the battery during discharge / charge, respectively.

$$C_{pass} = I_d \cdot t_d \quad (6)$$

Practical calculation of C_{pass} can be performed by an integrated Coulomb counter during battery charge or discharge or by direct measurement of current and time.

4. Battery minimum diagnosis for dynamic monitoring of its technical state during the life cycle.

It should be noted that battery diagnosing in the process of their life cycle will allow to effectively calculate the time of replacement and to carry out long–term planning of their maintenance.

Of course, the effectiveness of such measures will increase significantly with the use of modern information technology, electronic measuring devices, development of dynamic interfaces, creation of interactive databases, etc. First of all, it should be noted that some measurements are indirect to determine the SoC and SoH of the battery.

Therefore, to implement the GB diagnostic model, for example, to develop a dynamic interface for long–term maintenance planning, we will determine the amount of the battery minimum diagnosis to monitor its SoC and SoH .

On the analysis of the correlation analysis results, the set of the minimum diagnostic parameters to assess the battery technical state is based on the possibility of

The vertices of the graph corresponding to the battery's electrical parameters (internal resistance, design capacity, full–charge capacity and discharge current) are marked in orange, and SoH and SoC are marked in pink.

Parameters the correlation between which more than 0,5 is proposed to be used for the battery minimum diagnosis in the course of their life cycle, taking into account the existing lack of time.

their dynamic monitoring and analytical calculations. Namely, the 12ST–85R battery minimum diagnosis will be to monitor its Open–circuit voltage, temperature and passed charge capacity.

According to the authors, a promising direction in the development of battery operation can be considered the development of *Battery Tracks* – software and hardware devices for Battery care and battery management [9].

By monitoring SoC and SoH of the lead–acid battery using such a device, it is possible to provide a better user experience by continuously and accurately reporting the remaining charge, and also by cautioning when a battery needs to be replaced.

In the future, the authors plan to explore the possibility of monitoring such important battery's parameters impedance, depth of discharge, residual capacity, etc.

Conclusions

1. Analysis of the experience of the lead–acid batteries operation determines a set of diagnostic parameters, which can be used to draw a conclusion about the technical state of a battery and change of its electric, operational and design properties.

As generalized diagnostic parameters of the battery technical state can be considered the State of Health and the state of charge SoC .

2. Statistical data processing using the mathematical apparatus of correlation analysis allows to determine the causal and dependencies between the battery's parameters and make their assessment based on the established criteria.

3. Presentation of generalized results in the form of a correlation galaxy makes it possible to build a diagnostic graph–model of causal relationships of battery’s parameters in the form of a correlation galaxy.

4. Control of the SoC and SoH of the lead–acid battery will ensure the monitoring of the remaining

charge, as well as the issuance of a warning about the need to replace the battery.

A promising direction in the development of battery operation can be considered the development of battery–powered trackers – software and hardware devices capable of caring for battery care and battery management.

REFERENCES

1. Gumelev, V.Yu. and Kochurov, A.A. (2013), “Factors Affecting Battery Life”, *Issledovaniya v oblasti yestestvennykh nauk*, No. 5, available at: <http://science.snauka.ru/2013/05/4946>.
2. Yurov, Yu.Yu., Postnikov, A.A. and Gumelev, V.Yu. (2015), “Brief evaluation of methods for diagnosing lead–acid storage batteries”, *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii*, No. 12, available at: <http://technology.snauka.ru/2015/12/8775>.
3. Kochurov, A.A., Shevchenko, N.P. and Gumelev, V. Yu. (2009), *Teoreticheskiye osnovy resheniya problemy uvelicheniya srokov sluzhby akkumulyatornykh batarey pri khranении i povysheniya effektivnosti sposobov ikh vosstanovleniya* [Theoretical foundations for solving the problem of increasing the service life of storage batteries and improving the efficiency of methods for their recovery], RVAI, Ryazan, RU.
4. Patrick T., Moseley, Jurgen, Garche, C.D. Parker, and D.A.J. Rand (2004), *Valve–Regulated Lead–Acid Batteries*, Elsevier B. V., NL, Amsterdam.
5. Aleshkin, A.A. (2013), “Method of on–line diagnostics of the available capacity of lead–acid accumulators (batteries)”, *Elektrokhimicheskaya energetika*, No. 1, pp. 46–53.
6. Postnikov, A.A., Yurov, Yu.Yu. and Gumelev, V.Yu. (2018), “Evaluation and selection of parameters for monitoring the technical condition of batteries”, *Nauchnyy rezerv*, No. 1(1), pp. 54–59.
7. (2020), *Battery Council International, Lead Acid Batteries*, available at: http://batteryCouncil.org/?page=Lead_Acid_Batteries.
8. (2020), *Battery University, How to Measure State–of–Charge*, available at: http://batteryUniversity.com/learn/article/how_to_measure_state_of_charge.
9. Simon, Wen (2006), *Impedance Track™ Gas Gauge for Novice*, Application Report (SLUA375), Texas Instruments, available at: <http://www.ti.com/lit/an/slua375/slua375.pdf>.
10. Grzhibovsky, A.M. (2008), “Correlation analysis”, *Ekologiya cheloveka*, No. 9, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/korrelatsionnyy-analiz>.
11. (2020), *Lead–acid batteries: The growing need for monitoring state–of–charge and health*, Cambridge, MA, URL: <https://www.electronicproducts.com/lead-acid-batteries-the-growing-need-for-monitoring-state-of-charge-and-health/>
12. Borovikov, V.P. and Borovikov, I.P. (1998), *STATISTICA – Statistical analysis and data processing in the Windows environment*, “Filin”, Moscow, RU.

Received (Надійшла) 11.11.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.01.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Макогон Олена Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету “ХПІ”, Харків, Україна;

Helen Makogon – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Armored vehicles and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University “KhPI”, Kharkiv, Ukraine;

e–mail: helmkg@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1112-8707>.

Сучко Роман Ігоревич – магістрант за профілем кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету “ХПІ”, Харків, Україна;

Roman Suchko – Undergraduate Cadet of the Armored weapons and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine;

e–mail: romansuchko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4116-7336>.

Москаленко Віктор Іванович – доцент кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету “ХПІ”, Харків, Україна;

Viktor Moskalenko – Associate Professor of the Armored vehicles and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine;

e–mail: kaf_ing_fvp@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4183-7953>.

Калінін Ігор Вікторович – викладач кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна;

Igor Kalinin – Lecturer of the Armored weapons and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine;

e–mail: kalina7164@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3912-8285>.

Бурдін Сергій Вікторович – вчитель фізики, Державна гімназія–інтернат з посиленою військово–фізичною підготовкою “Кадетський корпус”, Харків, Україна;

Sergiy Burdin – Physics teacher, State boarding school with enhanced military and physical training “Cadet Corps”, Kharkiv, Ukraine;

e–mail: fisservik@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9946-7545>.

Ісариця Вікторія Вікторівна – вчитель вищої категорії, Державна гімназія–інтернат з посиленою військово–фізичною підготовкою “Кадетський корпус”, Харків, Україна;

Viktoriia Iksarytsia – teacher of the highest category, State boarding school with enhanced military and physical training “Cadet Corps”, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: vik05.69@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7288-0885>.

Застосування математичного апарату кореляційного аналізу для визначення обсягу мінімального діагностування при динамічному моніторингу технічного стану свинцево–кислотних акумуляторних батарей

О. А. Макогон, Р. І. Сучко, В. І. Москаленко, І. В. Калінін, С. В. Бурдін, В. В. Іксариця

Анотація. Предметом вивчення в статті є оцінка термінів служби та планування технічного обслуговування при експлуатації свинцево–кислотних акумуляторних батарей (АБ). Метою дослідження є розробка методики оцінки параметрів АБ та термінів їх служби для надання рекомендації по довгостроковому плануванню технічного обслуговування та заміни батарей при експлуатації у військах. Завдання дослідження: на основі досвіду експлуатації АБ визначити множини діагностичних параметрів, за якими можна зробити висновок про технічний стан АБ та зміну її електричних, експлуатаційних та конструкційних характеристик; визначити кореляційні залежності між параметрами АБ і зробити їх оцінку, виходячи з встановлених критеріїв; побудувати діагностичну граф–модель АБ у вигляді кореляційної плеяди; обґрунтувати мінімальне діагностування АБ, що може проводитися в процесі їх життєвого циклу з урахуванням наявного дефіциту часу. Методологічною основою дослідження стали загальнонаукові та спеціальні методи наукового пізнання. **Отримані наступні результати:** Визначено набір діагностичних параметрів для оцінки технічного стану акумуляторної батареї. Проведена статистична обробка даних з використанням математичного апарату кореляційного аналізу. Побудована діагностична граф–модель свинцево–кислотного акумулятора у вигляді кореляційної плеяди. Визначено обсяг мінімального діагностування батареї для оцінки технічного стану та терміну свинцево–кислотних акумуляторів протягом їх життєвого циклу. **Висновки.** Аналіз досвіду експлуатації АБ визначає множини діагностичних параметрів, за якими можна зробити висновок про технічний стан батареї та зміну її електричних, експлуатаційних та конструкційних характеристик. Узагальненими діагностичними параметрами технічного стану АБ можна вважати ступінь “здоров’я” акумулятора SoH та ступінь зарядженості SoC . Статистична обробка даних з використанням математичного апарату кореляційного аналізу дозволяє визначити причинно–наслідкові залежності між параметрами АБ і зробити їх оцінку, виходячи з встановлених критеріїв. Подання узагальнених результатів у вигляді кореляційної плеяди дає можливість побудувати діагностичну граф–модель АБ у вигляді кореляційної плеяди. Контроль SoC та SoH свинцево–кислотної батареї забезпечить моніторинг залишку заряду, а також видачу попередження про необхідність заміни батареї. Перспективним напрямом у розвитку експлуатації АБ можна вважати розробку акумуляторних трекерів –апаратних приладів, здатних аналізувати динаміку змін їх електричних характеристик та оцінку терміну служби.

Ключові слова: свинцево–кислотний акумулятор; догляд за акумуляторами; оцінка термінів служби; технічне обслуговування; експлуатація.

Применение математического аппарата корреляционного анализа для определения объема минимального диагностирования при динамичном мониторинге технического состояния свинцево–кислотных аккумуляторных батарей

Е. А. Макогон, Р. И. Сучко, В. И. Москаленко, И. В. Калинин, С. В. Бурдин, В. В. Иксариця

Аннотация. Предметом изучения в статье является оценка сроков службы и планирование технического обслуживания при эксплуатации свинцево–кислотных аккумуляторных батарей (АБ). Целью исследования является разработка методики оценки параметров АБ и сроков их службы для выработки рекомендаций по долгосрочному планированию технического обслуживания и замены батарей при эксплуатации в войсках. Задачи исследования: на основе опыта эксплуатации АБ определить множество диагностических параметров, по которым можно сделать вывод о техническом состоянии АБ и изменение ее электрических, эксплуатационных и конструкционных характеристик; определить корреляционные зависимости между параметрами АБ и сделать их оценку, исходя из установленных критериев; построить диагностическую граф–модель АБ в виде корреляционной плеяды; обосновать объем минимального диагностирования АБ, которое может проводиться в процессе их жизненного цикла с учетом имеющегося дефицита времени. Методологической основой исследования стали загальнонаукові та спеціальні методи наукового пізнання. **Получены следующие результаты.** Определен набор диагностических параметров для оценки технического состояния аккумуляторной батареи. Произведена статистическая обработка данных с использованием математического аппарата корреляционного анализа. Построена диагностическая граф–модель свинцево–кислотного аккумулятора в виде корреляционной плеяды. Определен объем минимального диагностирования батареи для оценки технического состояния и срока свинцево–кислотных аккумуляторов в течение их жизненного цикла. **Выводы.** Анализ опыта эксплуатации АБ определяет множество диагностических параметров, по которым можно сделать вывод о техническом состоянии батареи и изменении ее электрических, эксплуатационных и конструкционных характеристик. Обобщенными диагностическими параметрами технического состояния АБ можно считать степень “здоровья” аккумулятора SoH и степень заряженности SoC . Статистическая обработка данных с использованием математического аппарата корреляционного анализа позволяет определить причинно–следственные зависимости между параметрами АБ и сделать их оценку, исходя из установленных критериев. Представление обобщенных результатов в виде корреляционной плеяды дает возможность построить диагностическую граф–модель АБ в виде корреляционной плеяды. Контроль SoC и SoH свинцево–кислотной батареи обеспечит мониторинг уровня заряда, а также выдачу предупреждения о необходимости замены батареи. Перспективным направлением в развитии эксплуатации АБ можно считать разработку аккумуляторных трекеров – программно–аппаратных устройств, способных анализировать динамику изменений их электрических характеристик и оценку сроков службы.

Ключевые слова: свинцево–кислотный аккумулятор; уход за аккумуляторами; оценка сроков службы; техническое обслуживание; эксплуатация.

DETERMINING THE LOCATION OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE BASED ON VIDEO CAMERA IMAGES

Abstract. The paper deals with the problem of determining the location of an unmanned aerial vehicle from video and photo images taken by surveillance cameras. As the observation area is considered to be sufficiently limited, the area under consideration can be taken as part of a plane. The solution to the problem is based on the construction of a bijective mapping between the known geographic coordinates of three different objects recognized in the images and their coordinates relative to the monitor plane. To this end, the geographical coordinates of the objects (latitude and longitude) are first converted to the Mercator projection, and a bijective mapping is built between the coordinates of the objects calculated in the Mercator projection and the coordinates relative to the camera monitor plane. Then, based on the current orientation angles of the unmanned aerial vehicle, the coordinates of the projection of its position on the monitor plane are calculated, and the geographical coordinates are found by applying the inverse of the constructed bijective mapping.

Keywords: geographical coordinates; Mercator projection; unmanned aerial vehicle; bijective mapping; linear functional mapping; orientation angles; identification problem.

Introduction

As we know, the location of an unmanned aerial vehicle can be determined by processing data received from navigation devices (e.g. [1, 2]). However, due to the complex nature of the processing results, the accuracy of calculation of the aircraft's current location decreases due to measurement errors. It is considered advisable to regularly adjust the current coordinates of the aircraft, using alternative information sources in order to reduce errors accumulated during flight control.

At present, satellite-referenced aids are used at everyday level to obtain sufficiently accurate geographical coordinates of an object. However, due to irregular access to GPS data and its errors, the use of this information is unacceptable. In this regard, images made by video cameras installed on the aircraft can be an alternative source of information.

An aircraft can determine its location by image processing on the basis of different principles [3-5]. Different approaches are used depending on the nature of the problem being solved, the characteristics of the cameras taking pictures, as well as the number of pictures taken, the accuracy of object identification, and other criteria.

This paper considers the problem of calculating the location of an unmanned aerial vehicle based on video and photo images, taking the following principles as a basis for its solution:

- Since the areas shown in the images are quite small, they can be considered as part of a plane.
- It is possible to construct a bijective mapping of a regular nature between the coordinates calculated relative to the image for three real objects recognized in the images and their geographic coordinates.
- The constructed bijective mapping can be used to determine the position of the unmanned aerial vehicle relative to the observed objects in accordance with the orientation determined from navigation data.

Since the problem of identifying (recognizing) objects in video and photo images has been interpreted in various studies (e.g. [6, 7]), we will assume that the

problem of identifying objects in video and photo images has been solved and their geographic coordinates are known.

In view of the above, this study considers the problem of calculating the geographic coordinates of the projection of an aircraft on the earth's surface, on the basis of three objects recognized in images taken by the unmanned aerial vehicle, using the known orientation data of its camera.

Identification problem statement

For clarity, assume that the images from the video camera of an unmanned aerial vehicle are displayed on a rectangular monitor of a known size. To determine the position of the objects observed in the images relative to the monitor, we introduce the following $O\xi\eta\zeta$ coordinate system, which coincides with the center of the central monitor, i.e. the point of intersection of the rectangle diagonals.

Suppose the $O\xi$ and $O\eta$ axes, which are perpendicular to each other, go through the center of the monitor and are parallel to both its sides, and the $O\zeta$ axis is perpendicular to the $O\xi\eta$ plane and directed so that the $O\xi\eta\zeta$ coordinate system is a right-handed coordinate system (Fig. 1).

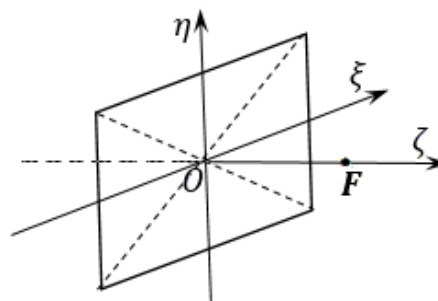


Fig. 1. $O\xi\eta\zeta$ local coordinate system relative to the monitor

In principle, the monitor can be positioned in space in such a way that the continuation of the straight lines connecting the monitor map of real points observed by the video camera intersect at the same point called the

point of view or observation. Let us denote the point of observation by F . It is clear from the design of the optical system of video cameras that point F will be located on the Oz axis.

In cartography, when transferring the earth's surface to 2D paper maps, the geographical coordinates of objects are reflected in a rectangular coordinate system called the Mercator projection [8, 9, 10]. Given the limited field of view of video cameras, the earth's surface in circles of medium length can be fairly accurately equated to the Mercator projection. This allows using the Mercator projection as an interval set and constructing a bijective mapping between the monitor coordinates of the objects and their geographic coordinates.

On the other hand, because of the fixed attachment of the video camera to the unmanned aerial vehicle, it is possible to determine the spatial position of the device relative to the earth, using the information from its navigation devices (gyroscopes). In other words, we can calculate how, relative to the earth, and, consequently, where the video camera aimed at the objects of observation is positioned.

The mathematical formalization of this approach is given in the following paragraphs.

Mathematical model of the identification problem

To this end, let us consider two tasks. The first task involves constructing a bijective mapping between the geographical coordinates of three points, which are recognized on the earth's surface and not located on a straight line, and the coordinates of the points reflected on the video camera monitor.

Suppose that an unmanned aerial vehicle through its video camera observes three points A_1, A_2, A_3 on the earth's surface, and the geographical coordinates (latitude and longitude) of these points are known. Denote the geographical coordinates of the points A_j by (v_j, u_j) , respectively, $(j = 1, 2, 3)$.

Suppose that the points A_1, A_2, A_3 are mapped onto some points B_1, B_2, B_3 on the video camera monitor. Let the coordinates of these points in the $O\xi\eta\zeta$ rectangular coordinate system introduced relative to the monitor be $(\xi_1, \eta_1, 0)$, $(\xi_2, \eta_2, 0)$, $(\xi_3, \eta_3, 0)$, respectively.

The bijective mapping $\Psi: (v, u) \rightarrow (\xi, \eta)$ can be constructed as follows.

Denote the coordinates of the object's Mercator projection by (x, y) . According to [10, P.44], the transformation $\Psi_M: (v, u) \rightarrow (x, y)$ can be defined by formula (1).

$$\begin{cases} x = R \cdot v, \\ y = R \cdot \ln \left(\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{u}{2} \right) \left(\frac{1 - \varepsilon \cdot \sin u}{1 + \varepsilon \cdot \sin u} \right)^{\frac{\varepsilon}{2}} \right). \end{cases} \quad (1)$$

Here, $\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{r^2}{R^2}}$, R and r are the equatorial and polar radii of the Earth, respectively.

Formulas (1) are given in analytical form, and using them, we can calculate the coordinates (x_j, y_j) , $(j = 1, 2, 3)$ of the points A_j in the Mercator projection and thus consider them known.

Let us write the formulas for the connection between the coordinates of points in the Mercator projection and the known coordinates of their mapping on the monitor plane $O\xi\eta$. Essentially, these formulas can be written as an affine transformation $\Psi_A: (\xi, \eta) \rightarrow (x, y)$ in the following form:

$$\begin{cases} a_{11}\xi + a_{12}\eta + b_1 = x, \\ a_{21}\xi + a_{22}\eta + b_2 = y. \end{cases} \quad (2)$$

To calculate the coefficients of transformations (2), we need to solve the equations simultaneously $\Psi_A(\xi_j, \eta_j) = (x_j, y_j)$, $j = 1, 2, 3$. The unknowns in the first and second equations of system (2) are inherently independent of each other and can be calculated separately.

Consider the following system of equations for the unknowns a_{11}, a_{12}, b_1 .

$$\begin{cases} a_{11}\xi_1 + a_{12}\eta_1 + b_1 = x_1, \\ a_{11}\xi_2 + a_{12}\eta_2 + b_1 = x_2, \\ a_{11}\xi_3 + a_{12}\eta_3 + b_1 = x_3. \end{cases} \quad (3)$$

Let us denote the main determinant of system of equations (3) by Δ , then from the explicit form of the main determinant

$$\Delta = \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix},$$

it is easy to see that if the points B_j are not located on a straight line, $\Delta \neq 0$ and the unknowns a_{11}, a_{12}, b_1 can be unambiguously calculated from system (3).

By writing a similar system of equations, we can also calculate the coefficients a_{21}, a_{22}, b_2 . Thus, we have constructed the mapping Ψ_A . The mapping Ψ_A has the form of a linear functional dependence and it has the inverse Ψ_A^{-1} .

Consequently, the mapping Ψ is constructed as a superposition of the operators Ψ_M and Ψ_A^{-1} :

$$\Psi = \Psi_A^{-1} * \Psi_M.$$

Obviously, the inverse of the operator Ψ_M can be specified in iterative form, thus the bijective mapping Ψ is constructed.

Now let us proceed to the second task. It consists in calculating the coordinates of the point of the unmanned aerial vehicle's projection on the earth's surface, which will be observed on the video camera monitor, using the angles of the aircraft's spatial orientation.

As a rule, the field of view of the video camera is directed perpendicularly downward relative to the unmanned aerial vehicle that carries it. Therefore, based on the orientation angle of the vehicle, we can determine the direction of view of the video camera relative to the earth.

The orientation angles are yaw φ , pitch θ and roll γ angles, which determine the position of the unmanned aerial vehicle relative to the earth. Let us briefly explain the definition of these angles in accordance with [11]. To do this, we introduce the $O_g X_g Y_g Z_g$ earth-fixed coordinate system so that the $O_g X_g Y_g$ plane coincides with the Mercator projection, and the $O_g Z_g$ axis is directed perpendicularly upward relative to the $O_g X_g Y_g$ plane.

Let us define two specific directions related to unmanned aerial vehicles. In fixed-wing drones, we can distinguish a vector $\mathbf{N}$ directed along its longitudinal axis and a vector $\mathbf{E}$ perpendicular to the symmetry plane of the drone. In rotary-wing drones, vectors $\mathbf{N}$ and $\mathbf{E}$ are determined by selecting a direction defined as “forward-backward”.

Yaw angle φ is the angle between the projection of the vector $\mathbf{W}$ on the $O_g X_g Y_g$ plane and the specific selected direction. As a rule, the north direction of the meridian is chosen as this direction.

Pitch angle θ is the angle between the vector $\mathbf{W}$ and the $O_g X_g Y_g$ plane.

Roll angle γ is the angle between the vector $\mathbf{N}$ and the OY_g axis of the $O_g X_g Y_g Z_g$ coordinate system, when the yaw angle is zero.

The coordinates of any vector fixed to an unmanned aerial vehicle during flight can be calculated by applying a vector transformation depending on the current orientation angles of the aerial vehicle as follows [11]. For the considered argument τ in formula (4), $\cos \tau$ and $\sin \tau$ are denoted by C_τ and S_τ , respectively, $\tau = \varphi, \theta, \gamma$.

$$\begin{pmatrix} x'_0 \\ y'_0 \\ z'_0 \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

where $\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}$ is the coordinates of the vector under consideration relative to the earth, when $\varphi = \theta = \gamma = 0$, $\begin{pmatrix} x'_0 \\ y'_0 \\ z'_0 \end{pmatrix}$ is the coordinates of that vector for the current $(\varphi, \theta, \gamma)$, calculated relative to the earth,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} C_\theta C_\varphi & -C_\theta S_\varphi & -S_\theta \\ C_\gamma S_\varphi - S_\gamma S_\theta C_\varphi & C_\gamma C_\varphi + S_\gamma S_\theta S_\varphi & -S_\gamma C_\theta \\ S_\gamma S_\varphi + C_\gamma S_\theta C_\varphi & S_\gamma C_\varphi - C_\gamma S_\theta S_\varphi & +C_\gamma C_\theta \end{bmatrix}.$$

Take point $M(0,0,1)$ on the line of sight of the video camera. In principle, the location of the point M in space can be equated to the location of the aircraft. Let the point of projection of this point on the video camera monitor be $B_0(\xi_0, \eta_0, 0)$, and the point of projection on the earth's surface – $A_0(x_0, y_0)$. Then we can calculate the coordinates of the point B_0 by applying transformation (4):

$$\begin{cases} \xi_0 = -\sin \theta, \\ \eta_0 = -\sin \gamma \cos \theta. \end{cases}$$

Here we can calculate the geographic coordinates of the point A_0 corresponding to the point B_0 on the earth's surface by applying the inverse transformation $\Psi^{-1} = \Psi_M^{-1} * \Psi_A$ (Fig. 2).

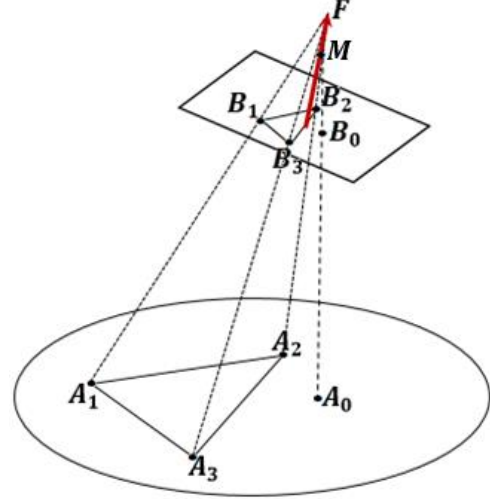


Fig. 2. Schematic representation of the points on the earth's surface mapped on the monitor plane

To this end, we first calculate the coordinates of the point A_0 in the Mercator projection, using the mapping Ψ_A , according to formulas (2):

$$\begin{cases} a_{11}\xi_0 + a_{12}\eta_0 + b_1 = x_0, \\ a_{21}\xi_0 + a_{22}\eta_0 + b_2 = y_0. \end{cases}$$

Now we can calculate the coordinates of the geographic latitude and longitude of the point A_0 by applying the inverse transformation Ψ_M^{-1} . As can be seen from (1), the geographic latitude of the point will be calculated using a simple formula:

$$v_0 = \frac{x_0}{R}.$$

Ψ_M is a nonlinear mapping, therefore, to construct its inverse, we need to apply an iterative calculation procedure.

For the value of geographical longitude, we construct successive approximations $u^{(k)}$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) as follows. As the initial iteration $u^{(0)}$, we can take the geographic longitude of one of the base points or of the location of the unmanned aerial vehicle determined during the previous measurements. Then iterations (5) can be applied until the required accuracy is achieved [10, P.44]:

$$u_0^{(k+1)} = \frac{\pi}{2} - 2 \arctg \left(\left(\frac{1 - \varepsilon \cdot \sin u_0^{(k)}}{1 + \varepsilon \cdot \sin u_0^{(k)}} \right)^{\frac{\varepsilon}{2}} \exp \left(\frac{-y_0}{R} \right) \right), \quad (5)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots.$$

Conclusions

Thus, in order to solve the problem of determining the location of an unmanned aerial vehicle from the video and photo images taken by it, we propose constructing a bijective mapping between the geographical coordinates and the images on the camera monitor. The construction

of this mapping is based on the recognition of three different objects, which are shown in the images and whose geographic coordinates are known. To solve the problem, it is necessary that the recognized points should not be located on a straight line. The solution algorithm is simple and easily implementable by the processor of the unmanned aerial vehicle.

REFERENCES

1. Bukov, V.N., Bogdanov, V.D., Gladkov, B.M., Ivanov, D.G. & Serikov, N.N. (1995), *Automated processing of flight information*, VoenIzd, Moscow, 249 p.
2. Alyoshin, B.S., Afonin, A.A. & Veremeyenko, K.K. (2006), *Orientation and navigation of mobile objects: modern information technologies*, Fizmatlit, Moscow, 424 p.
3. Bezmenov, V.M. (2009), *Photogrammetry. Construction and adjustment of analytical phototriangulation*, KSU, Kazan, 86 p.
4. Krasnopevtsev, B.V. (2008), *Photogrammetry*, UPP "Reprografiya" MIIGAiK, Moscow, 160 p.
5. Martynova, L.A., Koryakin, A.V., Lantsov, K.V. & Lantsov, V.V. (2012), "Determination of coordinates and parameters of object movement based on image processing", *Kompyuternaya Optika*, Vol. 36, Issue 2, pp. 266-273.
6. Gostev, I.M. (2010), "Methods for identifying graphic objects based on geometric correlation", *Fizika Elementarnykh Chastits i Atomnogo Yadra*, Vol. 41, Issue 1, pp. 49-96.
7. Kazbekov, B.V. (2013), *Identification of mobile ground objects from an unmanned aerial vehicle*, Dissertation for a degree of Candidate of Technical Sciences, Moscow, 159 p.
8. Mozhherin, V.V. (2005), *Workshop on cartography. Mathematical basis of maps (teaching aid)*, KSU, Kazan, 99 p.
9. Levitskaya, T.I. (2017), *Basics of geodesy: a study guide*, Publishing House of the Ural University, Yekaterinburg, 88 p.
10. John J., Snyder (1987), *Map projections - A Working Manual United States Government Printing Office*, Washington, 383 p.
11. (1980), *Aircraft dynamics in the atmosphere. Terms, definitions and designations*, GOST 20058-80, Moscow, 52 p.

Received (Надійшла) 29.11.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 03.02.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ ABOUT THE AUTHORS

Сабзієв Ельхан Наріман – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Інституту систем управління Національної академії наук Азербайджану, Баку, Азербайджан;

Elkhan Sabziev – PhD in Physics and Mathematics, Senior scientific researcher, Leading scientific researcher at the Institute of Control Systems of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan;

e-mail: elkhan.sabziev@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8150-9439>.

Визначення місця розташування безпілотного літального апарату на основі зображень відеокамер

Е. Н. Сабзієв

Анотація. У статті розглядається питання визначення місця розташування безпілотного літального апарату на основі фото, зроблених відеокамерами спостереження. Вважається, що зона спостереження досить обмежена і розглянуту територію можна сприймати як частину площини. Рішення проблеми засноване на побудові бієктивного відображення між відомими географічними координатами трьох різних об'єктів, розпізнаних на фотографіях, і їх координатами відносно площини монітора. Для цього спочатку переходимо від географічних координат об'єктів (широти і довготи) до координат в проекціях Меркатора і будемо лінійно-функціональне відображення між координатами об'єктів, розрахованими в проекції Меркатора і координатами відносно площини монітора відеокамери. Потім, виходячи з поточних кутів орієнтації безпілотного літального апарату, обчислюються координати проекції його розташування на площині монітора і знаходяться географічні координати із застосуванням зворотного побудованого бієктивного відображення.

Ключові слова: географічні координати; проекція Меркатора; безпілотний літальний апарат; бієктивне відображення; лінійно-функціональне відображення; кути орієнтації; задача ідентифікації.

Определение места расположения беспилотного летательного аппарата на основе изображений видеокамер

Э. Н. Сабзиев

Аннотация. В статье рассматривается вопрос определения местоположения беспилотного летательного аппарата на основе фото, сделанных видеокамерами наблюдения. Считается, что зона наблюдения достаточно ограничена и рассматриваемую территорию можно принимать как часть плоскости. Решение проблемы основано на построении биъективного отображения между известными географическими координатами трех различных объектов, распознанных на фотографиях и их координатами относительно плоскости монитора. Для этого сначала переходится от географических координат объектов (широты и долготы) к координатам в проекциях Меркатора и строится линейно-функциональное отображение между координатами объектов, рассчитанными в проекции Меркатора и координатами относительно плоскости монитора видеокамеры. Затем, исходя из текущих углов ориентации беспилотного летательного аппарата, вычисляются координаты проекции его расположение на плоскости монитора и находят географические координаты, применением обратного построенного биъективного отображения.

Ключевые слова: географические координаты; проекция Меркатора; беспилотный летательный аппарат; биъективное отображение; линейно-функциональное отображение; углы ориентации; задача идентификации.

Л. М. Сакович¹, Г. Я. Криховецький¹, Ю. В. Мирошніченко¹, І. Г. Ігнатенко²¹ Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна² Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна

ДІАГНОСТУВАННЯ ВТОРИННИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ

Анотація. У статті розглядається підхід до технічного діагностування вторинних джерел електроживлення засобів зв'язку. Діагностування здійснюється під час поточного ремонту. При цьому враховуються особливості об'єкту діагностування, що впливають на процес пошуку дефектів. **Мета статті** – аналіз можливих варіантів розробки діагностичного забезпечення вторинних джерел електроживлення. При цьому враховується метрологічна надійність засобів вимірювальної техніки. Також розраховується ймовірність правильної постановки діагнозу під час пошуку дефектів при поточному ремонті. Обґрунтовуються практично реалізуємі рекомендації щодо забезпечення необхідних значень показників ремонтпридатності засобів зв'язку. Показана можливість і доцільність використання ефективних методів діагностування вторинних джерел електроживлення засобів зв'язку, які розглядають джерела як багатовихідні об'єкти. Це дозволяє під час проєктування врахувати вимоги щодо ремонтпридатності виробу. При поточному ремонті мінімізується час пошуку дефектів. Це здійснюється за рахунок раціонального вибору діагностичних процедур. При виборі враховуються конструктивні особливості і умови відновлення працездатності. Запропонована блок-схема алгоритму вибору варіанту діагностування, що мінімізує середній час відновлення об'єкту. Приведений конкретний приклад використання отриманих результатів при розробці умовного алгоритму діагностування блоку електроживлення збудувача і радіоприймача радіостанції середньої потужності. Отримані результати доцільно використовувати при розробці діагностичного забезпечення перспективних засобів зв'язку або удосконалення існуючих засобів зв'язку без додаткових витрат.

Ключові слова: вторинні джерела електроживлення; діагностування; засоби зв'язку.

Вступ

Сучасна елементна база засобів зв'язку (ЗЗ) безперервно удосконалюється, але збільшення кількості елементів внаслідок автоматизації технологічних операцій і впровадження цифрових методів обробки інформації не веде до відповідного збільшення значення показників надійності. Особливо це суттєво впливає на ремонтпридатність виробів тому, що вимоги до середнього часу відновлення ЗЗ не змінюються. Аналіз надійності ЗЗ показує, що від 20 до 30 % відмов обумовлено недостатньою надійністю вторинних джерел електроживлення (ВДЕ) [1–3]. Ця обставина потребує удосконалення їх діагностичного забезпечення (ДЗ) з врахуванням сучасних досягнень в галузі метрології та технічної діагностики, чого не враховують відомі методики [4–8].

Мета статті – аналіз можливих варіантів розробки ДЗ ВДЕ з врахуванням метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) та ймовірності правильної постановки діагнозу під час пошуку дефектів при поточному ремонті з обґрунтуванням практично реалізуємих рекомендацій щодо забезпечення необхідних значень показників ремонтпридатності ЗЗ.

Математична постановка завдання. Відомо, що до 80 % середнього часу відновлення працездатності ЗЗ (T_{θ}) складає час діагностування (T_{θ}) [1, 2, 6]. Тому для забезпечення необхідного значення T_{θ} потрібно мінімізувати T_{θ} , тобто цільова функція досліджень має вигляд

$$T_{\theta}(x) = \min T_{\theta}(x^*); x^* \in \Delta; T_{\theta} \leq T_{\theta n},$$

де $T_{\theta n}$ – припустиме значення T_{θ} ЗЗ згідно керівних документів; x – параметри ДЗ; x^* – їх значення при рішенні завдання; Δ – область припустимих значень зміни параметрів.

Параметри підрозділяють на такі групи:

- конструктивні (L – загальна кількість елементів, M – число блоків, що їх об'єднують);
- метрологічні (t_{θ} – середній час виконання вимірювання, p – ймовірність правильної оцінки результату виконання перевірки, P – метрологічна надійність ЗВТ);
- технологічні (середні часи: t_y – усунення несправності, t_p – відключення роз'єму, t_n – підключення вбудованого ЗВТ, t_i – середній час оцінки стану індикаторів, t_z – середній час заміни блоку).

Алгоритм рішення завдання: 1) аналіз особливостей ВДЕ, як об'єкту діагностування;

2) узагальнення формул оцінки значень T_{θ} , при реалізації можливих варіантів діагностування;

3) приклад дослідження залежностей $T_{\theta}(M, t_{\theta})$;

4) формалізація процесу розробки ДЗ ВДЕ;

5) приклад розробки ДЗ ВДЕ ЗЗ.

Результати дослідження

1. Аналіз особливостей об'єкту діагностування. Розгляд схемної та конструктивної побудови ВДЕ [2, 3, 5] дозволяє визначити ряд особливостей, що зведено в табл. 1. Їх врахування на початковому періоді розробки ДЗ дозволяє максимально використовувати найбільш ефективні методи діагностування з мінімальними витратами.

Наприклад, залежно від конструкції ВДЕ і складу ЗІП доцільно використовувати процедуру пробних заміщень, яка потребує застосування ЗВТ

та знижує вартість пошуку дефектів. Так саме максимальне використання вбудованої системи контролю дозволяє за мінімальний час визначити несправний типовий елемент заміни (ТЕЗ). Аналогічний ефект досягається використанням методу відключень ТЕЗ, що також не потребує застосування ЗВТ на першому етапі діагностування. Врахування багаторежимності і наявності кількох

виходів ВДЕ також дозволяє скоротити простір пошуку і зменшити значення T_0 . Для фахівців ремонтних органів ЗЗ позитивне і те, що ВДЕ мають типові схеми та конструктивні рішення. Приведені в табл. 1 особливості ВДЕ дозволяють відокремити їх, як об'єкт діагностування і використовувати на першому етапі пошуку дефекту – визначенні несправного ТЕЗ або блоку.

Таблиця 1 – Врахування особливостей джерел електроживлення під час відновлення їх працездатності

Особливості об'єкту діагностування	Вплив на процес пошуку дефектів
Захист апаратної зв'язку від попадання на корпус змінної напруги	Суворе дотримання правил безпеки. Заміна безпосереднього вимірювання напруги перевіркою опору ізоляції
Наявність блокування високовольтних випрямлячів	
Захист від перевантаження в ланцюгах змінної і постійної напруги	Скорочення простору пошуку за результатами оцінки стану засобів зв'язку
Зміна значень струму і напруги в межах від 10^{-6} до 10^4	Необхідність використання різноманітних засобів вимірювань струму і напруги
Наявність змінних, постійних, імпульсних струмів і напруг	
Об'єднання електромеханічних, електричних та електронних засобів	Використання відповідних процедур і приладів діагностування
Конструкція у вигляді окремих блоків і типових елементів заміни	Використання процедури пробних заміщень без додаткових засобів вимірювальної техніки
Резервування найменш надійних блоків і плат	
Наявність в складі ЗПП окремих вузлів і плат	
Наявність засобів вбудованого контролю значень параметрів	Скорочення простору пошуку за результатами оцінки стану засобів вбудованого контролю
Наявність дефектів типу "обрив" і "перевантаження"	Необхідність використання спеціальних процедур пошуку дефектів, їх заміни в процесі діагностування
Багаторежимні та багатовихідні об'єкти	
Використання типових схемних і конструктивних рішень	Застосування типових методик і процедур діагностування, спрощення підготовки фахівців

2. Кількісна оцінка значень середнього часу діагностування вторинних джерел електроживлення засобів зв'язку. Узагальнення математичного апарату, приведені в [1-3, 9], з врахуванням досягнень технічної діагностики і метрології [6, 8], дає можливість розглянути варіанти пошуку дефектів:

1. Побудова умовного алгоритму діагностування (УАД) за відомими методиками [1, 2, 6, 8] без врахування структури ВДЕ.

2. Розглядається двохетапний процес пошуку дефекту: по-перше, визначення несправного ТЕЗ або блоку, а потім елементу, що відмовив. На 1 етапі за результатами аналізу вимірювань вихідних сигналів (змінних або постійних напруг) за допомогою зовнішніх ЗВТ визначають несправний ТЕЗ або блок, потім за УАД мінімальної форми з використанням цих же ЗВТ локалізують несправний елемент. 2 етап діагностування в наступних варіантах реалізується аналогічно.

3. На першому етапі пошуку – виконання процедури пробних заміщень без ЗВТ.

4. При відновленні підсистем електроживлення в ЗЗ великої розмірності з рознесеними в просторі елементами (наприклад, апаратні зв'язку або радіопередавальні станції великої потужності) працюють бригади фахівців, які реалізують груповий пошук дефектів. На обох етапах пошуку використовують однотипні ЗВТ.

5. На першому етапі пошуку – реалізація методу переключень, що не потребує застосування ЗВТ.

6. При наявності вбудованих ЗВТ або індикаторів, за їх допомогою визначають несправний ТЕЗ або блок.

Середній час діагностування ВДЕ, як багатовихідних об'єктів, кількісно оцінюють за виразами табл. 2, де $n = L/M$ – середня кількість елементів в блоці, μ – загальна кількість фахівців при груповому пошуку дефектів.

Таблиця 2 – Середній час діагностування багатовихідних об'єктів

№	Варіант		Середнє число перевірок		Середній час діагностування, T_i
	пошук блоку	пошук ел-ту	пошук блоку, K_δ	пошук елементу, K_e	
1	Загальний умовний алгоритм діагностування		$K = \frac{(n+1)(1+\log_2(n+1)) + n((M-1)(1+\log_2 n) + 0.5(M-1)M-1)}{1+nM}$		$T_1 = Kt_B / (p_k P)$
2	Вимірювання вихідних сигналів	УАД мінімальної форми	$\frac{(M-1)(M+2)}{2M}$	$\log_2(L/M)$	$T_2 = \left(\frac{K_\delta}{p^{K_\delta}} + \frac{K_e}{p^{K_e}} \right) \cdot \frac{t_B}{p}$
3	Процедура пробних заміщень	УАД мінімальної форми	$(M-1)(M+2)/(2M)$	$\log_2(L/M)$	$T_3 = K_\delta t_\zeta + K_\delta t_B / p^{K_\delta}$

4	Груповий пошук	УАД мінімальної форми	$\mu \left[\frac{M-1}{\mu} \right] \left(\left[\left[\frac{M-1}{\mu} \right] \right] + 1 \right) / (2M)$	$\log_2(L/M)$	$T_4 = \left(\frac{K_{\delta}}{p^{K_{\delta}}} + \frac{K_e}{p^{K_e}} \right) \cdot \frac{t_B}{p}$
5	Відключення роз'ємів	УАД мінімальної форми	$M(1-2^{-M})\log_2 M$	$\log_2(L/M)$	$T_5 = K_{\delta}t_3 + \frac{K_e t_B}{p^{K_e p}}$
6	Перевірка індикаторів або показників вбудованих ЗВТ	УАД мінімальної форми	M	$\log_2(L/M)$	$T_6 = \frac{K_{\delta}(t_p + t_i)}{p_1^{K_{\delta} p_1}} + \frac{K_e t_B}{p_2^{K_e p_2}}$

3. Дослідження впливу кількості блоків на час діагностування. Порівняємо варіанти діагностування ВДЕ при однакових умовах: $L = 256$; $p = 0,9997$; $P = 0,98$; $t_e = 3$ хв; $t_3 = t_p = t_n + t_i = 1$ хв [1, 2, 7]. Результати розрахунків приведено на рис. 1.

З їх аналізу слідує, що вибір варіанту діагностування суттєво впливає на час відновлення. Наприклад, якщо при $M = 5$ замість варіанту 3 використовувати варіант 5, то час діагностування збільшиться в 1,5 рази. Якщо зменшити t_e до 2 хвилин, то отримуємо іншу картину розподілу варіантів і при $M = 5$ найкращим буде варіант 4 (рис. 2). Взагалі на час діагностування впливають всі аргументи: μ , t_e , t_3 , t_p , t_n , t_i , p , P , L . Тому не існує найкращого варіанту діагностування для усіх випадків і залежно від особливостей ВДЕ і умов їх відновлення необхідно обирати той, що відповідає вимогам до ремонтпридатності. Приведені залежності мають фізичний сенс тільки при цілочислених значеннях аргументу M .

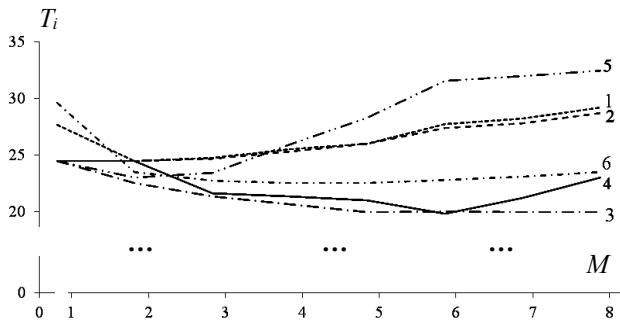


Рис. 1. Залежності середнього часу відновлення від кількості блоків ($t_e = 3$ хв)

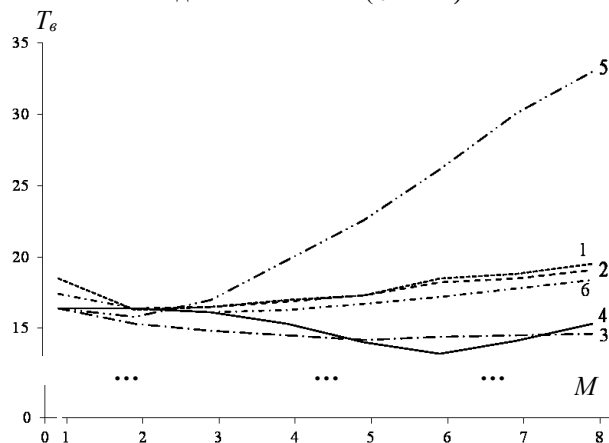


Рис. 2. Залежності середнього часу відновлення від кількості блоків ($t_e = 2$ хв)

4. Алгоритмізація вибору варіанту діагностування. Залежно від особливостей схемної і конструктивної побудови ВДЕ, а також умов

відновлення працездатності кількісно оцінюється час діагностування з використанням всіх можливих варіантів, потім вибирається найкращий по критерію мінімуму часу діагностування. З врахуванням середнього значення часу усунення несправності t_y кількісно оцінюється для обраного варіанту діагностування середній час відновлення. При використанні умови $T_b \leq T_{вп}$ розробляється УАД, якщо $T_b > T_{вп}$, то необхідна заміна вихідних даних: використання інших ЗВТ, підвищення кількості або кваліфікації виконавців. Блок-схема алгоритму вибору варіанту діагностування ВДЕ приведена на рис. 3.

5. Кількісна оцінка відхилення діагнозу при помилці фахівця в оцінці результату виконання перевірки. В роботах [10, 11] приведені результати досліджень діагностичних помилок при пошуку дефектів в одновихідних об'єктах. Їх використання для БВО неможливе: відмова елементів, що впливають на вихідні параметри одного виходу не ведуть до зміни вихідних параметрів інших, бо вони працюють незалежно.

При двохетапному пошуку дефектів спочатку визначають несправний блок, вихідні параметри якого виходять за припустимі межі. В цьому випадку використовують УАД максимальної форми — перевірки усіх вихідних сигналів з врахуванням ймовірності переважного вибору [1]. Для УАД недосконалої форми середнє значення відхилення діагнозу при одній помилці фахівця в оцінці результату вимірювання параметру дорівнює [10, 11]

$$\rho = \frac{1-p}{L} \sum_{i=1}^{K_{\max}} \ell_i (2^i - 1) p^{i-1} < 0.5,$$

де ℓ_i — кількість діапазонів після виконання i перевірок.

Цей вираз доцільно використовувати при оцінці якості діагностичного забезпечення другого етапу пошуку дефектів.

На першому етапі діагностування при поблочній перевірці БВО $l_i = 1$ і залежно від номеру помилки при вимірюванні параметру на виході отримуємо:

$$\rho_1 = (1-p)p^0; \quad \rho_2 = (1-p)p^1;$$

$$\rho_3 = (1-p)p^2; \dots; \rho_{M-1} = (1-p)p^{M-2},$$

тобто середнє значення математичного сподівання відхилення діагнозу дорівнює:

$$\rho = ((1-p)/M) \cdot \sum_{i=0}^{M-2} p^i = (1-p^M)/M.$$

6. Приклад розробки діагностичного забезпечення. Розглянемо використання

отриманих результатів на прикладі розробки діагностичного забезпечення ВДЕ збуджувача і радіоприймача радіостанції середньої потужності. До складу блоку БЗ-28 входять: 6 трансформаторів, 17 запобіжників, 2 перемикача, 10 випрямлячів, 10 фільтрів, 5 стабілізаторів напруги та вбудований вольтметр ($p = 0,971$). Блок має 14 виходів, вбудований засіб діагностування, багатовихідні елементи (трансформатори), однотипні вузли, всього $L = 52$. В такому разі доцільно використовувати варіант 6 діагностування ВДЕ з перевіркою всіх вихідних напруг вбудованим

вольтметром і пробними заміщеннями запобіжників.

На рис. 4 приведено бінарний УАД з середньою кількістю перевірок $K = 8$. УАД побудовано з врахуванням ймовірності переважного вибору – в першу чергу перевіряють виходи, на які впливає більше елементів і час перевірки мінімальний [1].

Оцінимо показники якості УАД за умови, що $T_{en} = 30$ хв, $t_y = 5$ хв, $t_n = 0,5$ хв, $t_e = 3$ хв, $t_s = 1$ хв – перевірка запобіжника омметром.

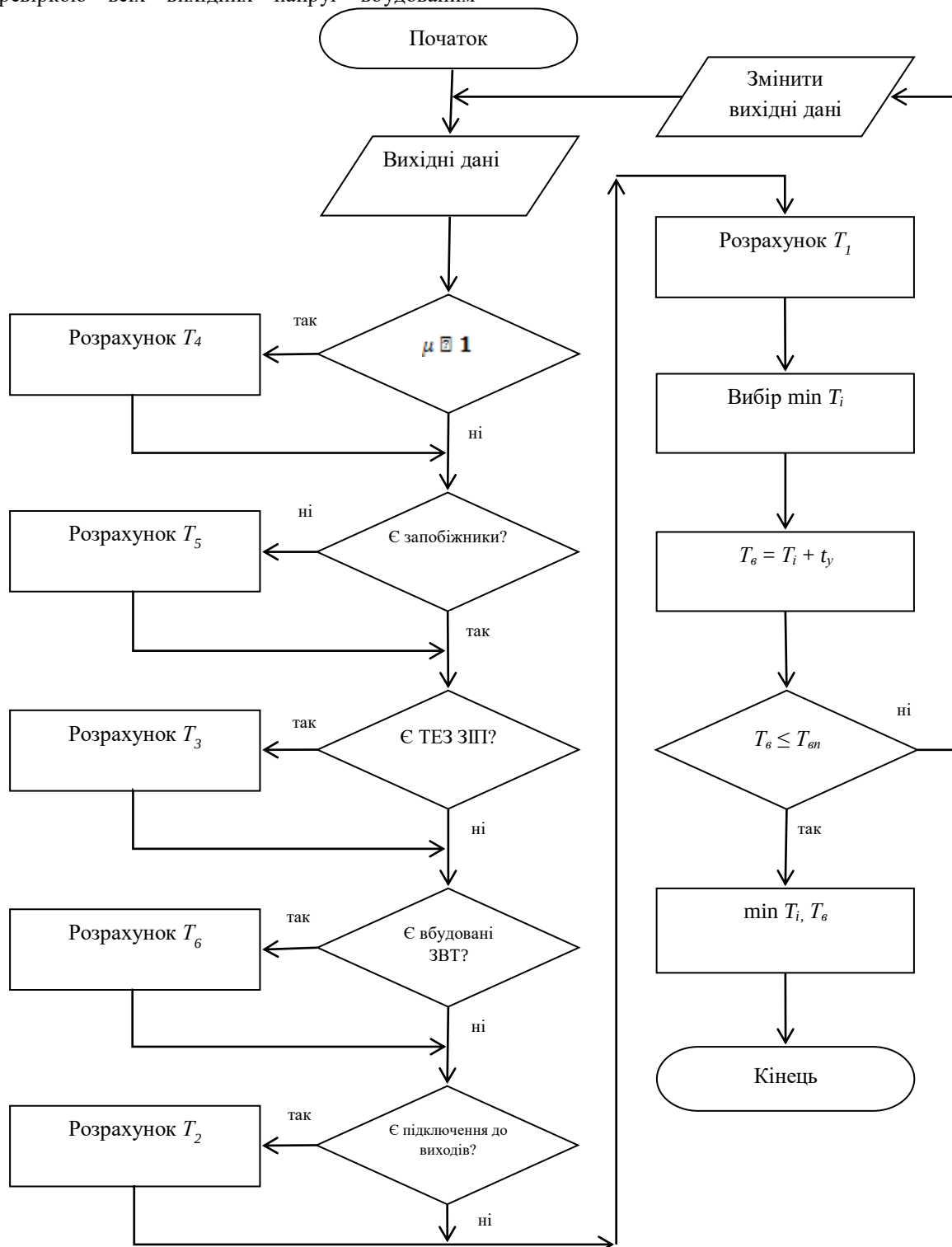


Рис. 3. Блок-схема алгоритму вибору варіанту діагностування

В такому разі середній час виконання перевірки складає :

$$t = \frac{0.5 \cdot 14 + 12 \cdot 1 + 37 \cdot 3}{52} = 2.5 (\text{хв.}).$$

При використанні омметра Ц-4340 $p_1 = 0,971$, а цифрового вольтметра В7-27А $p_2 = 0,9993$. Метрологічна надійність ЗВТ дорівнює $P = 0,978$.

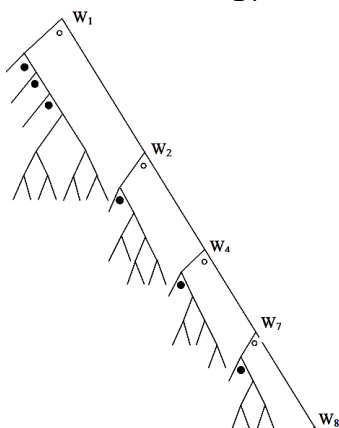
Середній час відновлення блоку електроживлення

$$T_{\text{ср}} = \frac{t \cdot K + t_y}{p_1 \cdot p_2 \cdot P} = 27 (\text{хв.}) < T_{\text{ен}} = 30 (\text{хв.}),$$

що задовольняє вимогам.

В УАД обмотки багатовихідних трансформаторів розглядаються, як окремі елементи. Оцінка математичного сподівання відхилення діагнозу при помилці фахівця не перевищує припустимі межі:

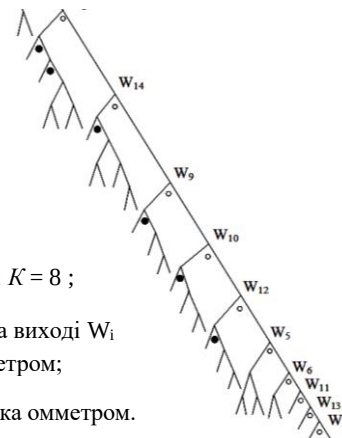
$$\rho = \frac{1 - 0.971^{14}}{14} \approx 0.071 < 0.5,$$



$$K_{\min} = 2; K_{\max} = 14; K = 8;$$

○ – перевірка напруги на виході W_i вбудованим вольтметром;

● – перевірка запобіжника омметром.

**Рис. 4.** Умовний алгоритм діагностування блоку електроживлення БЗ-28

Тобто УАД задовольняє усім вимогам і можливе його перетворення в діагностичну програму.

Висновки

Проаналізовані вторинні джерела електроживлення засобів зв'язку, як об'єкти діагностування. Встановлено вплив особливостей схемної і конструктивної побудови на вибір варіанту відновлення працездатності.

Приведені аналітичні вирази для кількісної оцінки часу діагностування можливими варіантами.

Досліджено вплив поділу джерел електроживлення на конструктивні блоки під час пошуку дефектів.

Показано відсутність універсального варіанту діагностування і необхідність його вибору в кожному конкретному випадку. Для цього запропонована блок-схема алгоритму вибору варіанту діагностування, що мінімізує середній час відновлення об'єкту.

Приведений конкретний приклад використання отриманих результатів при розробці умовного алгоритму діагностування блоку електроживлення збуджувача і радіоприймача радіостанції середньої потужності.

Подальші дослідження доцільно направити на методичне забезпечення розробки діагностичного забезпечення вторинних джерел електроживлення з кратними дефектами, отриманими в результаті аварійних або бойових пошкоджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ксёэнз С.П. Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств. Москва: Радио и связь, 1989, 248 с.
2. Сакович Л.Н., Бобро Р.А. Ремонт вторичных источников электропитания техники связи. *Зв'язок*, № 7, 2005, С. 56-60.
3. Желнов А.І., Романенко В.П. Електроживлення систем зв'язку. Київ: ІСЗІ НТУУ "КПІ", 2016, 84 с.
4. Липкань О. Военная техника связи. *УНИАН*, №28 (116), 2000. С. 9-10.
5. Сакович Л.Н., Курченко О.А. Диагностирование многовыходных аналоговых объектов. *Зв'язок*, № 3, 2001, С. 52-54.
6. Ксёэнз С.П., Полтаржицкий М.И., Алексеев С.П., Минеев В.В. Борьба с диагностическими ошибками при техническом обслуживании и ремонте систем управления связи и навигации. Санкт-Петербург: ВАС, 2010, 240 с.
7. Yevhen Ryzhov, Lev Sakovych, Maksym Yakovlev, Petro Vankevych, Yuriy Nastishin. Optimization of requirements for measuring instruments at metrological service of communication tools. *Measurement Journal of International Measurement Confederation*, 2018, Vol. 123, P. 19-25, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.055>.
8. Васишин В.І., Женжера С.В., Чечуй О.В., Глушко А.П. Основи теорії надійності та експлуатації радіоелектронних систем. Харків: ХНУПС, 2018, 268 с.

9. Сакович Л.М., Ходич О.В., Мирошніченко Ю.В. Дослідження умовних алгоритмів діагностування багато вихідних об'єктів. Київ: ІСЗІ КПІ, Спеціальні телекомунікаційні системи та захист інформації. Вип. 2 (8), 2020, С. 47-56.
10. Сакович Л.Н., Вансович Ю.П. Количественная оценка диагностических ошибок при восстановлении работоспособности техники связи. Зв'язок, № 5-6, 2008, С. 58 – 61.
11. Сакович Л.Н., Вансович Ю.П. Количественная оценка математического ожидания максимального отклонения диагноза. Зв'язок, № 3, 2009, С. 47 – 49.

REFERENCES

1. Ksenz, S.P. (1989), *Diagnostics and maintainability of radio-electronic means*, Radio and communication, Moscow, 248 p.
2. Sakovich, L.N. & Bobro, R.A. (2005), "Repair of secondary power supplies of sanctuary equipment", *Zviyazok*, No. 7, pp. 56-60.
3. Zhelnov, A.I. & Romanenko, V.P. (2016), *Electrical installation of communication systems*, NTUU "KPI", Kyiv, 84 p.
4. Lipcani, O. (2000), "Military communications equipment", *UNIAN*, No. 28 (116), pp. 9-10.
5. Sakovich, L.N. & Kurchenko, O.A. (2001), Diagnostics of multi-output analog objects, *Zviyazok*, No. 3, pp. 52-54.
6. Ksenz, S.P., Poltarzhitsky, M.I., Alekseev, S.P. & Mineev, V.V. (2010), "Fighting Diagnostic Errors in the Maintenance and Repair of Communication and Navigation Control Systems", VAS, St. Petersburg, 240 p.
7. Ryzhov, Yevhen, Sakovych, Lev, Yakovlev, Maksym, Vankevych, Petro & Nastishin, Yuriy (2018), "Optimization of requirements for measuring instruments at metrological service of communication tools", *Measurement Journal of International Measurement Confederation*, Vol. 123, pp. 19-25, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.055>.
8. Vasilishin, V.I., Zhenzhera, S.V., Chechuy, O.V. & Glushko A.P. (2018), *Fundamentals of the theory of reliability and operation of electronic systems*, KhNUPS, Kharkiv, 268 p.
9. Sakovich, L.M., Khodich, O.V. & Miroshnichenko, Yu.V. (2020), "Research of conditional algorithms for diagnosing many source objects", *Special telecommunication systems and information protection*, Vol. 2 (8), pp. 47-56.
10. Sakovich, L.N. & Vansovich, Yu.P. (2008), "Quantitative assessment of diagnostic errors in restoring the operability of communication equipment", *Zviyazok*, no. 5-6, pp. 58-61.
11. Sakovich, L.N. & Vansovich, Yu.P. (2009), "Quantification of the mathematical expectation of the maximum deviation of the diagnosis", *Zviyazok*, no. 3, pp. 47-49.

Received (Надійшла) 16.12.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.02.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Сакович Лев Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "КПІ імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна;

Lev Sakovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Special Communication and Information Protection of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine;
e-mail: lev@sakovich.com.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8257-7086>.

Криховецький Георгій Яремович – кандидат технічних наук, с. н. с., завідувач кафедри, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "КПІ імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна;

Heorhii Krykhovetskyi – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Head of Department, Institute of Special Communication and Information Protection of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine;
e-mail: kgeorg@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1771-6211>.

Мирошніченко Юрій Володимирович – аспірант, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "КПІ імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна;

Iurii Myroshnychenko – postgraduate student, Institute of Special Communication and Information Protection of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine;
e-mail: miroshnichenko_yuriy@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8603-9429>.

Ігнатенко Іван Григорович – студент, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна;

Ivan Myroshnychenko – student, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine;
e-mail: shika4440592@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4838-6104>.

Диагностирование вторичных источников электропитания средств связи

Л. Н. Сакович, Г. Я. Криховецкий, Ю. В. Мирошніченко, И. Г. Ігнатенко

Аннотация. В статье рассматривается подход к техническому диагностированию вторичных источников электропитания средств связи. Диагностирование осуществляется при текущем ремонте. При этом учитываются особенности объекта диагностирования, влияющие на процесс поиска дефектов. **Цель статьи** – анализ возможных вариантов разработки диагностического обеспечения вторичных источников электропитания. При этом учитывается метрологическая надежность средств измерительной техники. Также рассчитывается вероятность правильной постановки диагноза при поиске дефектов при текущем ремонте. Обосновываются практически реализуемые рекомендации по обеспечению требуемых значений показателей ремонтпригодности средств связи. Показана возможность и целесообразность использования эффективных методов диагностики вторичных источников электропитания средств связи, которые рассматривают источники как объекты с многими входами. Это позволяет при проектировании учесть требования по ремонтпригодности изделия. При текущем ремонте минимизируется время поиска дефектов. Это осуществляется за счет рационального выбора диагностических процедур. При выборе учитываются конструктивные особенности и условия восстановления работоспособности. Предложенная блок-схема алгоритма выбора варианта диагностирования минимизирует среднее время восстановления объекта. Приведен конкретный пример использования полученных результатов при разработке условного алгоритма диагностики блока электропитания возбудителя и радиоприемника радиостанции средней мощности. Полученные результаты

целесообразно использовать при разработке диагностического обеспечения перспективных средств связи или усовершенствовании существующих средств связи без дополнительных затрат.

Ключевые слова: вторичные источники электропитания; диагностирование; средства связи.

Diagnostics of secondary power supplies means of communication

Lev Sakovych, Heorhii Krykhovetskyi, Iurii Myroshnychenko, Ivan Ihnatenko

Abstract. The article discusses an approach to technical diagnostics of secondary power supplies for communication facilities. Diagnostics is carried out during the current repair. This takes into account the features of the object being diagnosed, which affect the process of searching for defects. The purpose of the article is to analyze possible options for the development of diagnostic support for secondary power supplies. This takes into account the metrological reliability of measuring equipment. The probability of correct diagnosis is also calculated when searching for defects during routine repairs. Practically implemented recommendations for ensuring the required values of the indicators of the maintainability of communication facilities are substantiated. The possibility and expediency of using effective methods for diagnostics of secondary power supplies of communication facilities, which consider the sources as objects with many inputs, are shown. This allows the design to take into account the requirements for the maintainability of the product. During routine repairs, the time needed to search for defects is minimized. This is done through a rational choice of diagnostic procedures. When choosing, design features and conditions for restoring performance are taken into account. The proposed block diagram of the algorithm for choosing a diagnostic option minimizes the average recovery time of an object. A specific example of using the results obtained in the development of a conditional diagnostic algorithm for the power supply unit of the exciter and the radio receiver of an average power radio station is given. It is advisable to use the results obtained in the development of diagnostic support for promising communication facilities or in the improvement of existing communication facilities without additional costs.

Keywords: secondary power supplies; diagnosing; means of communication.